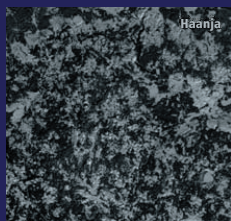


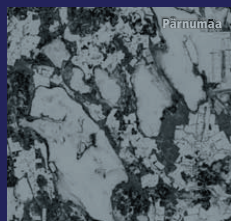
Sakala



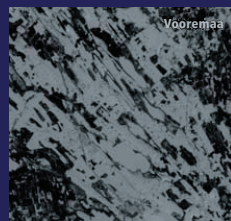
Alutaguse



Haanja



Pärnumaa



Vooremaa

KAUGSEIRE EESTIS 2016

ARTIKLIKOGUMIK



TARTU OBSERVATOORIUM
eesti kosmoseskeskus



Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

WWW.ETTLJ2016



TARTU ÜLIKOOL



KESKKONNAAGENTUUR

TARTU OBSERVATOORIUM

KAUGSEIRE EESTIS 2016

ARTIKLIKOGUMIK

TÕRAVERE 2016



Euroopa Liit
Euroopa
Regionaalarengu Fond



Eesti tuleviku heaks

Toimetajad: Urmas Peterson, Tiia Lillemaa

Eesti keele toimetaja: Sirje Nilbe

Inglise keele toimetaja: Krista Kallis

Kujundus: Tiia Lillemaa

Kaane kujundus: Triinu Sarv

Väljaandja:

Tartu Observatoorium

Observatooriumi 1, Tõravere

Nõo vald, 61602 Tartumaa

Tel: 696 2510

E-post: info@to.ee

Autoriõigus:

Artiklite autorid, Tartu Observatoorium, 2016

ISSN 2382-7661 (võrguväljaanne)

Sisukord

Saateks	7
Copernicus – Euroopa jälgib Maad	9
Anu Reinart, Ants Vain	
Mõõtmiste usaldusväärsus kaugseires	18
Viktor Vabson, Joel Kuusk, Krista Alikas, Ilmar Ansko, Martin Ligi, Tiia Lillemaa, Anu Reinart, Riho Vendt	
Järvelja peegeldusetalon	28
Andres Kuusk, Joel Kuusk, Mait Lang	
Hoonestatud alade tuvastamine Sentinel-1 tehisavaradari mõõtmiste põhjal	35
Kalev Koppel, Anni Sisas, Eva-Maria Tõnson, Kaupo Voormansik	
Rohumaade radarkaugseirest Eestis 2011–2016	42
Kaupo Voormansik, Tanel Tamm, Karlis Zalite	
UAV-ga kogutud andmete põhjal loodud ortofoto ja reljeefimudeli täpsus	49
Edgar Sepp, Tõnu Oja, Marko Kohv	
Puistute biomassi ja süsiniku hulga hindamine kaugseire abil	60
Mait Lang, Tauri Arumäe, Maris Nikopensius	
Aerolaserskaneerimise (ALS) andmestiku kasutamisevõimalustest Lahemaa ja Karula rahvusparki kultuurmaastike uurimisel	69
Mats Meriste, Kalev Sepp, Pille Tomson, Ants Vain	
Kuumalainete ja soojussaarte satelliitseire	85
Valentina Sagris, Mait Sepp	

Eestis esinevate konvektiivsete tormide pilv-maa-välke ja rahet detekteerivad parameetrid kaksikpolarimeetrilise Doppleri ilmaradari andmete põhjal	99
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

Tanel Voormansik, Pekka J. Rossi, Dmitri Moisseev, Tarmo Tanilsoo, Piia Post

Tsüanobakterite biomassi hindamine optiliselt keerukast ja madalast siseveekogust MERISE satelliiditulemite põhjal	110
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

Silja Pöldma, Evelin Kangro, Kersti Kangro

Eesti ja Euroopa järvede kaldaveetaimestiku, põhiliselt rannaroostike dünaamika Landsati piltide aegreas	121
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

Urmas Peterson, Jaan Liira

Saateks

Kaugseire mõiste, inglise keeles *remote sensing*, võttis teadaolevalt 1958. aastal esimesena kasutusele Evelyn Pruitt, geograaf USA Laevastiku-uuringute Büroost (US Office of Naval Research).^{*} Eesti keelde tõi kaugseire termini taimkatte biofüüsikalise uurimise koolkonna rajaja Eestis Juhan Ross. Eestikeelseid kaugseirealaseid kogumikke on praeguseks välja antud kolm: „Kaugseire Eestis“ (2008), „Kaugseire Eestis 2014“ ning nüüdne „Kaugseire Eestis 2016“. Käesolevasse kogumikku on kaastööd kirjutanud need kaugseire kui teaduse ja mõõtmiste korralduse ning tulemuste interpreteerimisega tegelejad, kes kahes eelmises kogumikus avaldatule lisaks on leidnud eestikeelsele lugejale uudseid ja huvipakkuvaid kaugseiremõõtmiste ja tulemuste üldistamise viise. Kogumikus „Kaugseire Eestis 2016“ on kaastöid Eestis kaugseirega tegelevatest asutustest: Tartu Observatooriumist, Tartu Ülikoolist, Eesti Maaülikoolist, Tallinna Tehnikaülikoolist, Maa-ametist ja Keskkonnaagentuurist. Selleaastase kogumiku kaheteistkümnest artiklist on enamik autoreilt, kes on kirjutanud ka kahte eelmisesse kogumikku.

Kogumiku avaartiklik on ülevaade Euroopa Liidu ja Euroopa Kosmoseagentuuri ESA käivitatud Euroopa keskkonna ja turvalisuse seire programmist Copernicus (Reinart ja Vain). Järgnevad kaks artiklit käsitlevad kaugseiremõõtmiste maapealsete tugimõõtmiste korraldamist: kaugseiremõõtmiste usaldusväärsuse tagamist maapealse vikaarkalibreerimisena (Vabson jt) ning atmosfäärialuste spektraalmõõtmiste kvaliteeti toetavat Tartumaal Järvel seljal paiknevat peegeldusetaloni ja selle omadusi (Kuusk, Kuusk ja Lang). Kogumikus on kaks artiklit radarkaugseirest: tehisaradararadi mõõtmistest hoonestusalade kaardistamisel (Koppel jt) ning rohumade niitmise tuvastamisest (Voormansik, Tamm ja Zalite). Mehitamata õhusõidukite kasutamist kaugseires käsitleb artikkel UAV piltidelt hinnatud ortofoto ja reljeefimudeli täpsuse hindamisest (Sepp, Oja ja Kohv). Eesti Maa-ameti lidarmõõtmiste tulemuste kasutamisest on kogumikus kaks kirjutist: ringproovitükkide ja lidarmõõtmiste tulemuste interpreteerimisest puistute biomassi ja süsiniku hulga hindamisest (Lang, Arumäe ja Nikopensius) ning ülevaade Maa-ameti lidarmõõtmiste rakendatavusest varase maakasutuse jälgede kaardistamiseks (Meriste jt). Spektri soojuspiirkonna kaugseireandmete interpreteerimisest on kogumikus üks artikkel – kuumalainete ja soojusaarte efektist Eesti linnalistes asulates (Sagris ja Sepp). Maapealse ilmaradari kaugseiremõõtmiste tulemuste interpreteerimist kirjeldab artikkel konvektiivsete tormide välkude parameetrite detekteerimisest ilmaradari andmete põhjal (Voormansik jt). Veekaugseire käsitlusi, mida 2014. a kogumikus oli kaheksa, esindab praeguses üks kaastöö – tsüanobakterite biomassi hindamisest Peipsi järvel (Põldma, Kangro ja Kangro). Eesti keskkonnaseire programmis aastaid seireobjektideks olnud suurjärvede, mereranna ja mõnede väikejärvede suurtaimestiku seire meetoodilise lahenduse rakendamist valikule Euroopa järvedest on kirjeldatud kogumiku viimases artiklis (Peterson ja Liira).

^{*} Estes, J. E., J.R. Jensen, and D.S. Simonett (1980). Impacts of remote sensing on US Geography. *Remote Sensing of Environment*, 10: 43-80.

Tähelepanuväärset on eelmises kahes kogumikus valdavaks olnud spektri optilise piirkonna satelliitkaugseiret selgitavatele töödele praeguses kogumikus lisandunud suurema valiku spektripiirkondade ja mitmekesisemate kaugseirevahenditega saadud tulemusi käsitlevad kirjutised.

Kogumik „Kaugseire Eestis 2016“ on mõeldud täiendama seniseid kahte kaugseirekogumikku. Kõik kolm koos annavad ülevaate, mida tähelepanuväärset on viimasel kümmekonnal aastal Eesti kaugseires tehtud. Kogumiku lugejatena on silmas peetud ülikoolide kaugseirekursuste üliõpilasi ning nende valdkondade asjast huvitatuid, millel on kokkupuuteid kaugseirepiltide kasutamise ja piltidelt loetavate tulemuste interpreteerimisega. Usutavasti pakub kogumik lugemisväärset laiemalegi huvilisteringile.

Urmas Peterson

Tiia Lillemaa

Copernicus – Euroopa jälgib Maad

Anu Reinart^{1,3}, Ants Vain^{2,3}

1 Tartu Observatoorium, Tõravere, Nõo vald, 61602 Tartumaa

2 Maa-amet, Mustamäe tee 51, 10621 Tallinn

3 Eesti esindaja Euroopa Komisjoni programmi Copernicus kasutajate foorumis

Kokkuvõte

Euroopa Liit koos Euroopa Kosmoseagentuuri ja teiste partneritega on käivitanud ulatusliku keskkonna- ja turvalisuse seire programmi Copernicus (varasem nimetus GMES).



Selle raames pannakse tööle kuus Sentinel-seeria missiooni satelliiti ja luuakse vastavad andmekogud. Kuigi Sentineli missioonide andmed on tasuta ja vabalt kättesaadavad, on seni olnud raske tagada kõigi andmete stabiilne ja sujuv käitlemine, mis on hädavajalik operatiivteenuste loomiseks. Eestis on plaanis luua selleks andmekeskus ESTHub Maa-ameti haldusalas. Esimesed sammud on juba tehtud – 13. septembril 2016 allkirjastasid Euroopa Kosmoseagentuur ja EAS (ametlik kontaktpunkt Eestis) andmevahetuslepingu, millega anti Maa-ametile juurdepääs ESA andmeserveritele. Artikkel annab ülevaate Copernicuse programmist ja tuumikteenustest, Sentinel-seeria satelliitidest ning nende andmete jaotamisest Eestis.

Võtmesõnad: programm Copernicus, Sentinel-seeria, ESTHub

Sissejuhatus

Maailm meie ümber on pidevas muutumises. Inimea jooksul toimuvate keskkonna- ja sotsiaalsete muutustega toimetulek ei ole kerge ei üksikisikule ega ka ühiskonnale tervikuna. Inimkonna teadmiste piiri avardamine ja sellega seotud tehnoloogia areng nõuavad kõigi ühist jõupingutust (OECD 2005). Euroopa kosmosepoliitika käsitleb kosmost kui iseseisvuse, heaolu, tööstusliku arengu, tehnoloogiliste saavutuste ja teadusliku progressi kindlustamise strateegilist vahendit, mis toetab jätkusuutlikku arengut Euroopas ja kogu maailmas. Oma kosmosepoliitika elluviimisel panustavad Euroopa riigid perioodil 2014–2020 üle 12 miljardi euro kolme suure ühise programmi kaudu:

1. Satelliitnavigatsioon – programmid Galileo ja EGNOS, mis pakuvad täpset positsioneerimis- ja navigeerimisinfot kogu maailma merenduse, liikluse ja päästegevuse tarbeks.

2. Maa jälgimine – programm Copernicus (<http://www.copernicus.eu/>), mis pakub andmeid ja informatsiooni Maa kohta keskkonna jälgimiseks, maakasutuse korraldamiseks, loodusõnnetuste ennetamiseks ja nende tagajärgede likvideerimiseks ning riikidevaheliste lepingute täitmiseks (nt piiride valvamine).

3. Kosmoseuuringud – osa programmist Horizon 2020 on keskendunud spetsiaalselt kosmosetehnoloogiatele ja nende rakendustele (alusuuringud, kliima, GNSS jne).

Käesolev artikkel annab ülevaate Copernicuse programmist, selle alla kuuluvatest Sentineli missioonidest, Sentineli andmetel põhinevatest tuumikteenustest ning andmete jaotamisest Eestis.

Programmi Copernicus eesmärgid

Copernicuse programmi on Euroopa Komisjon ja Euroopa Kosmoseagentuur (ESA) koos liikmesriikide ja partneritega teostanud alates 1998. aastast (varasem nimeetus GMES – *Global Monitoring for Environment and Security*). Selle kohta on pikem eestikeelne ülevaade ilmunud varasemas kaugseirekogumikus (Kaugseire Eestis, 2008). Copernicuse programmi eesmärk on kasutada teadmispõhiste tehnoloogiate saavutusi mitmekülgseks **keskkonnajuhtimiseks ja kindlustunde saavutamiseks**. See on teenuste võrgustik, mis aitab parandada keskkonna ja turvalisusega seotud elukvaliteeti ning võimaldab jälgida keskkonnaseisundi lühi- ja pikaajalisi arengutrende, et toetada poliitilisi otsuseid ning investeeringuid.

Copernicuse programmi eesmärk on:

- teenindada Euroopa poliitikat ja rahvusvahelisi kokkuleppeid;
- toetada riiklikke ja piirkondlikke arenguid ja rakendusi;
- stimuleerida tehnoloogiat ja turu arengut.

Seadusandlik raamistik Copernicuse programmile on loodud Euroopa Parlamendi ja nõukogu määrustega (täpsem ülevaade (EL) nr 377/2014). Komisjon on kaubamärgina registreerinud nime „Copernicus“, nii et liidu institutsioonid saavad seda kasutada ja teistele huvitatud kasutajatele, eriti põhiteenuste osutajatele, saab anda kasutuslitsentsi. Programm põhineb EL, ESA ja liikmesriikide vahelisel koostööl, tugineb olemasolevale suutlikkusele ning täiendab seda ühiselt arendatud uute vahenditega. Oma põhieesmärkide täitmisel peaks Copernicus kasutama Euroopa ärialgatusi, aidates sellega kaasa Euroopa elujõulise ärilise kosmosesektori arengule. Lisaks tuleks edendada süsteeme andmeedastuse optimeerimiseks, et olla võimeline vastama kasutajate suurenevale vajadusele peaaegu reaajas edastatavate andmete järele ((EL) nr 377/2014).

Copernicuse programmi koordineerib ja juhib Euroopa Komisjon. Kosmose komponendi – satelliitide ja andmejaamade – arendamine on Euroopa Kosmoseagentuuri vastutada ning *in situ* taristu arendamine Euroopa Keskkonnaagentuuri pädevuses. Mõlemad kaasavad oma oluliste vastutusvaldkondade töösse ka teisi partnereid.

Eesti kui EL liikmesriik on kaasatud Copernicuse ettevalmistamisse ja käivitamisse riiklikul tasemel, kuid teadlased ja ettevõtted on osalenud ka iseseisvalt paljudes koostööprojektides, konverentsidel ning rahvusvahelistes võrgustikes.

On ilmne, et Eesti jaoks olulisi kliimamuutuste või näiteks Läänemere seisundi probleeme ei ole võimalik täielikult mõista ega lahendada, kasutades vaid meie

käsituses olevaid kohapealseid andmeid. Samas on Eestis kogutud andmetel oluline osa Maa kui kompleksse süsteemi toimimise mõistmiseks. Tihedam andmevahetus eri riikide ja rahvusvaheliste organisatsioonidega, mõõtmismeetodite ja -protokollide ühtlustamine ning tegevuse koordineerimine on vastastikku kasulik kõigile osapooltele. Rahvusvahelistes programmides osalemine seab Eestile nii kohustusi kui pakub ka uusi võimalusi.

Eestiski on Maa jälgimise teenused seatud kosmosevaldkonna arendamisel üheks prioriteediks, sest kasu sellest täppispõllumajanduse, metsaressursside hindamise, tervisliku ja turvalise elukeskkonna, efektiivse liikluse ja linnade planeerimise alal on mujal maailmas juba kinnitust leidnud. Copernicuse programmi kuuluvad mitmed süsteemid, mis koguvad keskkonnaandmeid Maa jälgimise satelliitidelt ning *in situ* sensoritelt – mõõtmised õhust, merelt ja maalt. Kogutud andmed töödeldakse ning tehakse lõpptarbijale kättesaadavaks temaatiliste keskkonna- ja turvalisuste teenuste kaudu.

Copernicuse tuumikteenused

Copernicuse programmi võib tinglikult jagada kolme ossa:

- 1) olemasolev ja kavandatav kosmosetaristu,
- 2) maapealsed (ka ookeanis asuvad) mõõtesensorid (*in situ* mõõtmised) ning
- 3) tuumikteenused.

Copernicuse andmete põhikasutajaks on avalik sektor, kellel on vaja informatsiooni keskkonnavalase seadusandluse ja poliitika täiustamiseks või reageerimiseotsuste vastuvõtmiseks kriisiolukorra puhul, näiteks looduskatastroofi või humanitaarkriisi korral. Avaliku või erasektori spetsiifiliste vajaduste katmiseks on võimalik arendada Copernicuse teenustel baseeruvaid lisandväärtusega teenuseid.

Andmete vabalt ja tasuta kättesaadavus loob uusi võimalusi taolisi teenuseid välja töötada. Seda on Copernicuse programmi raames juba tehtud. Euroopa Komisjon on tellinud oma partneritelt tähtsate valdkondade kohta teenuseid, mida nimetatakse tuumikteenusteks. Kombineeritult toetavad need teenused paljude eesmärkide saavutamist, sealhulgas keskkonnakaitse, linnaalade planeerimise ja haldamise, regionaalse ning kohaliku planeerimise, põllumajanduse, metsanduse, kalakasvatuse, tervishoiu, transpordi, kliimamuutuste, turvalisuse ja turismi valdkonnas. Teenused soodustavad uute äriühingute teket ning omavad majandusanalüüsides järelduste põhjal väga suurt potentsiaali uute töökohtade loomisel ning innovatsiooni ja kasvu soodustamisel.

Euroopa Komisjoni poolt tellitud tuumikteenused jagatakse kuude valdkonda:

- atmosfääriseire,
- kliimamuutuste ja nende mõjurite seire,
- maismaaseire,
- hädaolukordade juhtimine,
- merekeskkonna seire,
- julgeolek.

Maismaaseire teenuse eest vastutab Euroopa Keskkonnaagentuur (EEA) ning teenuse tutvustus on kättesaadav veebilehel <http://land.copernicus.eu/>. Teenus koosneb eri tasemega andmetööstlustest (globaalne, üleeuroopaline, lokaalne ja kohtvaatluste tase) ning pakub ülevaateinfot mitmesuguste maakattega seotud teemade kohta.

Atmosfääriseire teenus hõlmab endas väga mitmekesist infot atmosfäärinäitajate kohta, nagu õhu kvaliteet, päikesekiirgus, UV ja osoon jne. Teenust arendab Euroopa ilmateenistus ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), vt <http://atmosphere.copernicus.eu/>.

Merekeskkonna seire teenust arendab koordinaatorina Prantsusmaa ettevõtte Mercator Ocean. Teenus pakub pidevat ja süstemaatilist informatsiooni ookeanide ja merede ökosüsteemide kohta nii globaalsel kui ka regionaalsel tasemel. Teenuse esimene avalik tutvustus toimus Tallinnas 18. aprillil 2016. Arendustööde oluliseks partneriks on olnud TTÜ meresüsteemide instituudi teadlased. Teenusega saab tutvuda lehel <http://marine.copernicus.eu/>.

Hädaolukordade juhtimise teenus pakub satelliidiandmetel põhinevat informatsiooni katastroofide (looduslike või inimtekkeliste) ning humanitaarkriiside jälgimiseks. See teenus pole päris igaühele vabalt kasutatav, vaid tulenevalt teenuse eripärist on ligipääs piiratud. Teenuse eest vastutab Euroopa Komisjoni JRC (*European Commission Joint Research Centre*) ning see on ligipääsetav aadressil <http://emergency.copernicus.eu/>.

Julgeoleku tuumikteenus (<http://www.copernicus.eu/main/security/>) pakub informatsiooni piirivalvele ELi piires nii maal kui merel, aga ka tuge kolmandatele riikidele kriisilukordades. Maismaa poole pealt on teenuse juures vastutavaks täitjaks ELi asutus FRONTEX, merel aga EMSA (*European Maritime Safety Agency*), kolmandate riikide kriisikolletega tegeleb ELi SatCen (*European Union Satellite Centre*). Teenuse kasutamiseks tuleb sõlmida riikidevahelised kokkulepped.

Kliimamuutuste ja nende mõjurite seire tuumikteenus annab informatsiooni mitme kliimaindikaatori kohta – temperatuuri kasv, merepinna tõus, jää sulamine, ookeanide soojenemine jms. Teenuse kodulehelt on võimalik rohkem informatsiooni leida: <http://climate.copernicus.eu/>.

Tuumikteenused on mõeldud kasutamiseks regionaalsel või globaalsel tasemel. Eesti-suguse väikese riigi jaoks võivad nad jääda detailsuse poolest ebapiisavaks. Küll aga on võimalik tuumikteenuste baasil luua n-ö lisandväärtusteenuseid, mis arvestavad kindla regiooni või riigi konkreetsete huvidega, näiteks jääseire Väinameres või Liivi lahes, mis globaalsel skaalal ehk kuigi palju huvi ei pakuks. Kuna andmed on vabalt ja tasuta kättesaadavad, siis võiks taoliste teenuste väljatöötamine olla kasulik ka väikeriikides, eriti kui kasutada oma nutikust ja teadmisi eksporditavate teenuste arendamiseks.

Sentineli missioonid

Copernicuse teenuste oluliseks komponendiks on satelliidiandmed. Programm hõlmab kuut missiooni, millest igaühel on oma eesmärk, tulenevalt infovajadusest ja tehnoloogilistest võimalustest.

Sentinel-1 on missioon, mille täiskonstellatsioon koosneb kahest teineteise suhtes 180° nihkega asetsevast satelliidist. Koos töötades annavad nad Maast täispildi iga kuue päeva järel. Satelliidid kannavad SAR-seadet (sünteesilise avaga radar), mis võimaldab iga kuue päeva järel teostada möõtmisi ka läbi pilvede ja öisel ajal. SAR mõõdab C-lainealas ning selle parim ruumiline lahutusvõime on 5 meetrit, suutes katta kuni 400 km laiuse riba. Praeguseks on orbiidil Sentinel-1A (aprill 2014) ja Sentinel-1B (aprill 2016), millega saavutati ka missiooni täiskonstellatsioon. Sentinel-1 satelliidid võivad mõõta väga erinevates režiimides ning sellest oleneb ka saadud andmestiku kasutatavus – näiteks jääseireks, kiireks reageerimiseks hädaolukordades, üleujutuste, maavärinate või muude looduskatastroofide korral.



Joonis 1. Sentinel -1 (vasakul) ja Sentinel-2. (ESA/ATG medialab).

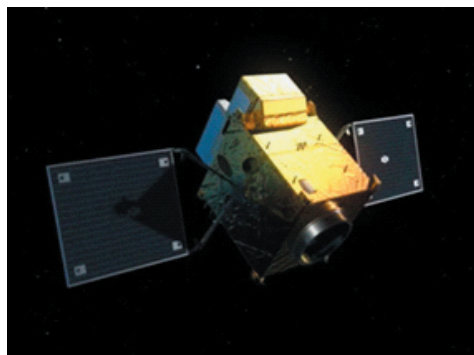
Sentinel-2 satelliit kannab uutset kõrglahutusega mitme spektrikanaliga (13) pildiskannerit, pakkudes andmestikku maapinna ja taimkatte kaugseirerakendusteks. Lai vaatenurk (290 km), palju spektrikanaleid ning tihedam ülendude arv (Eesti kohal paar korda nädalas) loovad optilises seires unikaalse situatsiooni. Hetkel on orbiidil Sentinel-2A (juuni 2015), 2B on plaanis üles saata 2017. aastal.

Sentinel-3 on kaheldamatult Copernicuse programmi kõige keerukam missioon. Satelliit kannab komplekti mitmest kõige paremast instrumendist, et pakkuda süstemaatilist ülevaadet Maa ookeanidest, maapinnast, jääoludest ja atmosfäärist tervikuna. Need andmed võimaldavad mõista globaalseid muutusi Maa kliimas ja pakkuda kriitilise tähtsusega infot ookeanide kohta ja ilmaennustuste tarbeks. Sentinel-3 valideerimismeeskonnas osalevad ka Eesti kaugseirajad Tartu Observatooriumist ja Eesti Mereinstituudist. Sentinel-3 kasutab paljuski ESA eelmise suure Maa jälgimise missiooni ENVISAT kogemusi. Veebruaris 2016 saadeti orbiidile Sentinel-3A, 2017. aastal on plaanis saata orbiidile 3B.



Joonis 2. Sentinel-3. (ESA–Pierre Carril).

missiooniga ka satelliidi MTG-Imager pardal paikneva EUMETSATi pildiskanneri (FCI) andmed. Neid mõõtmisi kasutatakse kasvuhoonegaaside ja saasteainete määramiseks. Sentinel-5 missioon realiseeritakse polaarorbiidil oleva MetOp teise põlvkonna satelliidina, mis kannab ultravioletse, nähtava ja lähisinfrapunapiirkonna spektromeetrit (UVNS) ja veel kolme instrumenti (EUMETSAT IRS, *Visible Infrared Imager – VII, Multi-viewing Multi-channel Multi-polarization Imager – 3MI*). Sentinel-5P missiooni üks eesmärgi on vähendada lünka andmetes, mis on tekkinud seetõttu, et ENVISATi missioon lõppes 2012. aastal ootamatult ja selle pardal olnud instrumendile Sciamachy ei ole asendajat, enne kui käivitub Sentinel-5. ESA ja Hollandi ühise missioonina viiakse orbiidile UNVS instrument Tropomi. Sentinel-4 ja Sentinel-5 missioonide eesmärk on toetada Euroopa poliitikaid ning teenuseid õhukvaliteedi, stratosfääriosooni, päikesekiirguse ja kliima jälgimiseks.



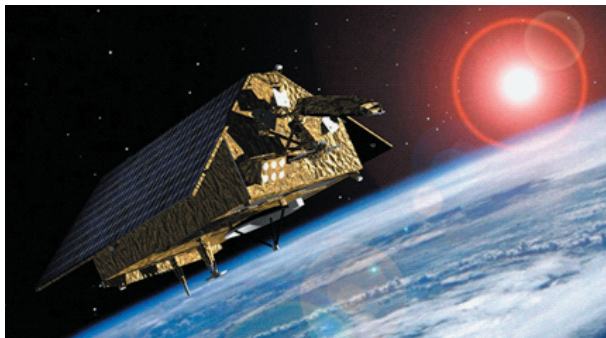
Joonis 3. Sentinel-4 mudel.
(EUMETSAT).



Joonis 4. Sentinel-5 mudel.
(Airbus Defence and Space).

Sentinel-6 missioon on mõeldud ookeanide veetaseme määramiseks radaraltimeetri abil. Ookeanide topograafia andmed on vajalikud kliimamuutuste mõjude jälgimiseks ja operatiivseks okeanograafiaks. Kaardistades 95% Maa jäävabast ookeanist iga 10 päevaga, pakub see missioon hoovuste ning lainekõrguse ja -kiiruse infoga olulist tuge turvalisuse suurendamisele merenduse valdkonnas. Sellised andmed on vajalikud ka kiirelt muutuvate rannikupiirkondade paremaks

majandamiseks. Sentinel-6 missioonil kasutatakse olulisel määral Jason-seeria satelliitide ja ESA CryoSati missiooni õppetunde. Sentinel-6 missioon täiendab ka Sentinel-3 abil veekogude jaoks kogutavat infot.



Joonis 5. Jason-CS / Sentinel 6 mudel (ESA).

Tabel 1. Sentinel-satelliitide toimunud ja lähiajaks planeeritud stardid.

Satelliit	Sentinel-1A	Sentinel-1B	Sentinel-2A	Sentinel-2B	Sentinel-3A	Sentinel-3B	Sentinel-5P	Sentinel -6
Start	03.04.14	25.04.16	22.06.15	28.02.17	16.02.16	30.11.17	03.2017	06.2020

Programmi Copernicus andmete kättesaadavus Eesti kasutajatele

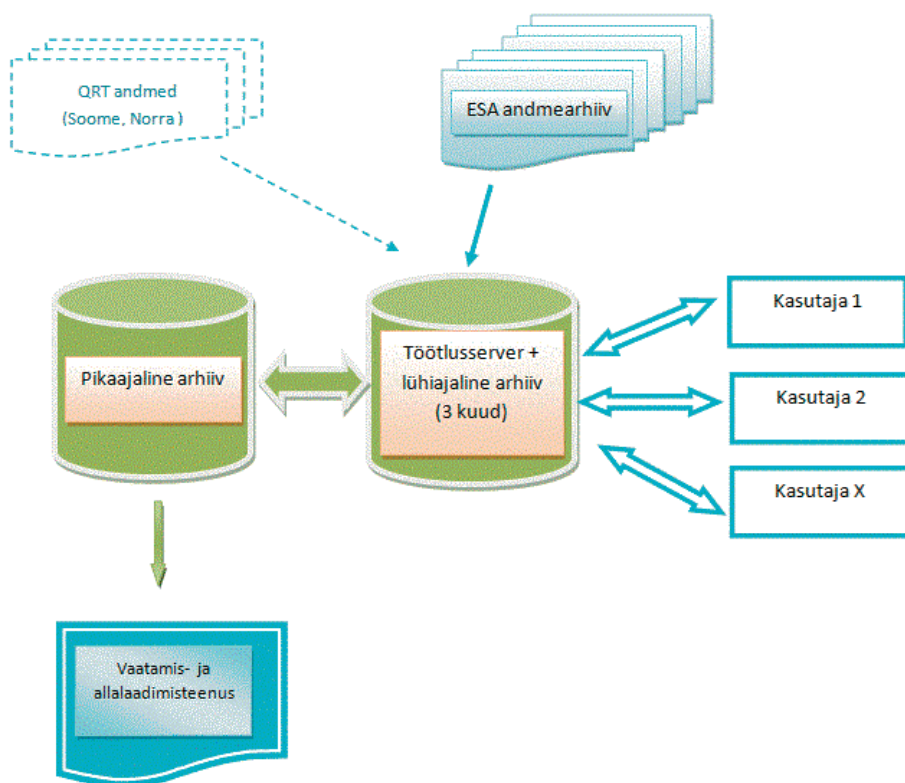
Kuigi Sentineli missioonide andmed on tasuta ja vabalt kättesaadavad, ei pruugi kõik kasutajad olla rahul jaotuskeemiga, mida pakub Euroopa Komisjon. Ühtne jaotusportaal (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>) on tihti üle koormatud ning esineb muid tehnilisi viperusi. Ühtse jaotusportaali kaudu on praeguseks alla laaditud 5,9 PB jagu andmeid, kokku on seal 5,2 miljonit faili ning registreeritud kasutajaid üle 40 000. Seega on raske üles ehitada töötavat teenust, kui alusandmete kättesaadavus pole stabiilne ja igal ajal garanteeritud. Andmete kättesaadavuse parandamiseks on riigid ise investeerinud andmekeskustesse ning arhiveerivad, töötlevad ja jaotavad riigi huvipiirkonda jäävaid andmeid ise.

Eestis on plaanis luua andmekeskus Maa-ameti haldusalasse. Esimesed sammud selleks on juba tehtud, sest 13. septembril 2016 allkirjastasid Euroopa Kosmoseagentuur ja EAS (ametlik kontaktpunkt Eestis) andmevahetuslepingu, millega anti Maa-ametile juurdepääs ESA andmeserveritele.

Loodavat andmekeskust on hakatud nimetama ESTHub ning see koosneb kahest komponendist. Esiteks on pikaajaline arhiiv, kuhu arhiveeritakse Sentineli missioonide andmed ning eri töötlustasemed Eesti huvipiirkonna (ca 200 km välispiirist) kohta. Arhiiviserveris olevad andmed tehakse tasuta kättesaadavaks kõigile (vajalik küll eelnev registreerimine). Teise komponendi keskusest moodustab töötlusserver, kus toimub algandmete töötlemine, parandamine (nt LiDARi kõrgusmodeliga) ja andmete riiklikku koordinaatsüsteemi viimine. Samuti hoitakse seal andmeid, mis pole vanemad kui 3 kuud, sest suure tõenäosusega toimub suurem osa kasutajate

andmetöötlust just kõige värskemate andmete pealt. Oluline on siinjuures fakt, et toorandmed asuvad töötlusserveri juures (jääb ära tülikas andmete kopeerimine). Andmekeskuse kasutajatena nähakse peamiselt riigiasutusi (nt PRIA ja KAUR), kes on oma töö tõttu huvitatud Sentineli andmetest. Töötlusserveris saavad kasutajad oma algoritmide põhjal teha andmetöötlust ning salvestada oma andmesüsteemi ainult tulemikihi (nt lageraiete alad). Sellega vähendatakse asjatut ning ajamahukat andmete kopeerimist ja dubleerimist. Niisugust kasutajapõhist andmetöötlust pole siiski plaanis pakkuda kõigile, arvestatakse töötlusserveri võimekusega ning töötluste tähtsusega.

On plaanis pakkuda ka teenust, kus ettevõtjad saavad läbi Maa-ameti alla laadida andmeid ükskõik millise huvipiirkonna kohta maailmas. Neid andmeid hoitakse keskses kaks nädalat, mille järel need kustutatakse. Aegkriitiliste (*quasi real-time*, QRT) andmete saamiseks võib teha koostööd Soome või Norraga, kellel on oma maa-jaamad, mille kaudu on võimalik andmeid saada mõnekümne minuti jooksul satelliidi ülelennust alates. Aegkriitilised andmed on olulised näiteks jääkaartide koostamisel (ka Peipsi järve jääinfo tarvis).



Joonis 6. ESTHubi andmekeskus. Andmeid saadakse ESA serverist (QRT-andmete puhul kas Soomest või Norrast), need töödeldakse ning arhiveeritakse.

Peale Sentineli andmete on võimalik Copernicuse programmi kaudu saada juurdepääs ka ESA koostöömissioonide (*Contributing Missions*) andmetele. Neid on juba olemas või lähiajal planeeritud ligi 30 missiooni jagu. Nende alla kuuluvad ESA ja selle liikmesriikide missioonid, EUMETSATi ja kolmandate osapoolte opereeritavad missioonid. Täpsem info saadaolevatest andmetest on leitav lehelt <http://spacedata.copernicus.eu>.

Kasutatud kirjandus

OECD Report Space 2030: Tracking Society's Challenges (2005). ISBN: 9789264008328.

Reinart, A., Kutser, T., Dišlis, T. (2008). Keskkonna ja turvalisuse globaalse seire (GMES) teenused. Kaugseire Eestis: artiklikogumik. Tartu Observatoorium, KKM Keskkonnainfo 2008.

Euroopa Parlamendi ja nõukogu määrus (EL) nr 377/2014, 3. aprill 2014.

Copernicus - European eye on Earth

Summary

European Programme for Global Monitoring of Environment and Security (GMES/Copernicus) was established already in 1998. This Earth monitoring initiative led by the Union and carried out in partnership with the Member States and the European Space Agency (ESA) is a long-term commitment to the development of space-based environmental monitoring services, making use of, and further developing, European skills and technologies. The strategic aim has been to develop jointly with the ESA an independent European Earth observation capacity to deliver services in environmental and security fields. The system includes series of space based infrastructure among which six types of Sentinel satellites have a significant role. Data from these satellites are free of charge for any user in Member States. For quicker and better use of the data as well as for the sake of stable services, Estonia has signed the data availability contract with the ESA. A contact for the storage, processing and distribution of Copernicus data will be the Estonian Land Board (institution responsible for spatial data over Estonia).

Mõõtmiste usaldusväärsus kaugseires

Viktor Vabson, Joel Kuusk, Krista Alikas, Ilmar Ansko, Martin Ligi,
Tiia Lillemaa, Anu Reinart, Riho Vendt

Tartu Observatoorium, Tõravere, Nõo vald, 61602 Tartumaa

Kokkuvõte

Maapealsed tugimõõtmised kui vikaarkalibreerimise lahutamatu osa tagavad Maa seiresatelliitide andmete efektiivse kasutamise. Vikaarkalibreerimine ei tähenda satelliidisensorite absoluutset radiomeetrilist kalibreerimist, kuid soodsates tingimustes kindlustab see satelliidiandmetest leitud suurusele $L_w(\lambda)$ määramatuse, mis tuleneb põhiliselt vikaarkalibreerimist kindlustava maapealse $L_w(\lambda)$ tugimõõtmise määramatusest. See saavutatakse $L_w(\lambda)$ arvutamisel, kui hästikalibreeritud ja püsivalt kontrollitud satelliidisensorite abil atmosfääri kohal määratud $L_T(\lambda)$ väärtusi justeeritakse vikaar-g-tegurite abil. Süsteemi latusaks toimimiseks peaks pidevalt käigus hoidma vähemalt ühte lokaalset radiomeetriliste tugimõõtmiste kohta, mis kindlustaks parima võimaliku mõõtemääramatuse ja lubaks aja jooksul optimeerida tugiskaala g-tegurite väärtusi. Äärmiselt oluline on muidugi ka adekvaatsete atmosfäärimudelite rakendamine, mis peaks tagama eri missioonide ja asukohtade jaoks arvutatud tulemuste omavahelise kooskõla. Tartu Observatooriumi teadlased osalevad ESA projekti FRM4SOC raames aktiivselt rahvusvahelises koostöös selle valdkonna arendamisel.

Võttesõnad: kalibreerimine, tugimõõtmine, SI-jälgitavus, kaugseire

Sissejuhatus

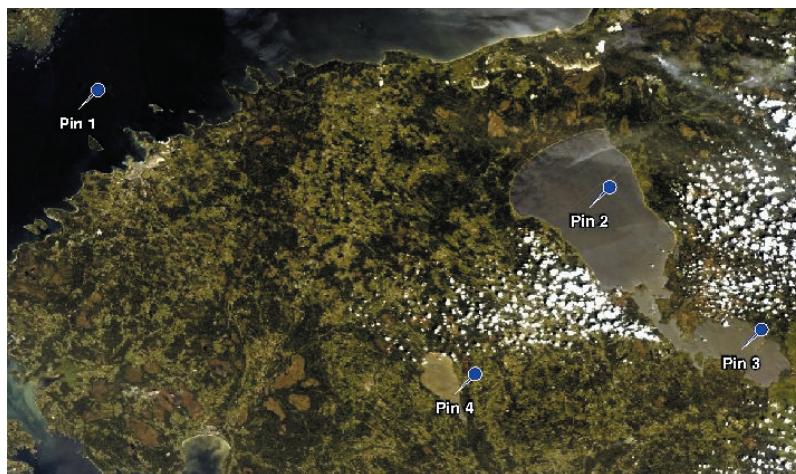
Juba 1998. aastal pandi alus kõigi aegade ambitsioonikaimale kaugseireprojektile, millest on nüüdseks välja kasvanud Euroopa Komisjoni ja Euroopa Kosmoseagentuuri (ESA) juhitud Copernicuse programm. Selle programmi raames saadetakse Maa orbiidile üle 20 Sentinel-seeria seiresatelliidi, mille jaoks on vaja tagada nende mõõteandmete efektiivne kasutamine. Enne orbiidile saatmist satelliidisensorid kalibreeritakse ja nende kalibreerimisseisundi kontrollimiseks tehakse kogu satelliidi eluea jooksul püsivalt tugi- ja võrdlusmõõtmisi. Satelliidi ja maapealsete mõõteandmete kooskõla tagatakse nn vikaarkalibreerimiste süsteemi abil, mis seab atmosfääripealsed mõõtmised vastavusse atmosfäärialuste mõõtmistega. Euroopa Kosmoseagentuur on algatanud mitu pilootprojekti, et luua ühtne arusaam nõuetest, millele maapealsed tugimõõtmised peaksid vastama. Nõuded hõlmavad aparatuuri, mõõte- ja kalibreerimisprotseduure ning omavahelisi võrdlusmõõtmisi ja peaksid tagama piisavalt täpse, usaldusväärse ning rahvusvahelise mõõtühikute süsteemi (SI) ühikuteni kindlalt jälgitava tugiskaala. Neid pilootprojekte seob ühine lühend FRM ingliskeelsest nimetusest *Fiducial Reference Measurements*, mida võiks eesti

keelde tõlkida kui usaldusväärse tugiskaala määramine. Nii on algatatud näiteks atmosfäärikoostise (FRM4AC), altimeetria (FRM4ALT), radarkaugseire (FRM4SAR), kasvuhoonegaaside (FRM4GHG) ja merepinna temperatuuri (FRM4STS) jälgimise projektid.

Sentinel-seeria satelliitidest on Sentinel-2 ja Sentinel-3 pardal optilised spektro-radiomeetrid, mis seiravad maad ja vett nähtavas ja lähiiinfrapuna spektripiirkonnas. Kummastki tüübist on orbiidil juba üks satelliit ning lähima 15 aasta jooksul lisandub veel kolm, kokku seega kaheksa satelliiti. Nende satelliitide mõõdetud veekogude seireandmete kvaliteedi tagamiseks on samuti oma projekt – FRM4SOC (*Fiducial Reference Measurements For Satellite Ocean Colour*). Selle projekti rahvusvahelist meeskonda juhivad Tartu Observatooriumi teadlased ning tegu on esimese ESA avatud hanke lepinguga, mis võidetud Eesti asutuse juhtimisel.

Vikaarkalibreerimiste süsteem

Optilisel kaugseirel on arvukalt rakendusi veekogude, jääkatte, põllumajanduslike pindade ja metsa seisukorra hindamiseks, geoloogias ja hüdroloogias, maa kasutusel ja kaardistamisel, atmosfääriprotsesside, Maa temperatuuri ja kliimamuutuste jälgimiseks. Kaugseiresatelliidid võimaldavad efektiivselt katta suuri vaatlusalasid, edastades suhteliselt tihti oma vaatluspiirkonna digitaalkujutisi spektri eri piirkondades, kattes tavaliselt nähtava ja lähiiinfrapunase lainepikkuste piirkonna (400...2500) nm [1]. Satelliitkaugseirega võrreldes on vahetult objektide kohal tehtud lokaalsete mõõtmiste abil saadud andmete maht väike ja kulutused andmete kogumiseks märgatavalt suuremad. Samas satelliidi digipilt (joonis 1) annab infot vaatluspiirkonnast lähtuva kiirguse atmosfäärivälise spektraalse jaotuse kohta sensori tundlikkuspiirkonnas ja see võib märgatavalt erineda lokaalsete atmosfääriluste mõõtmiste andmetest.



Joonis 1. Satelliidisensori MERIS pilt Soome lahest ja Eestist. Pin 1 ja Pin 4 tähistavad asukohti, mille veepinnalt peegeldunud kiirguse spektrid on näidatud joonisel 5.

Selleks et teha satelliidiandmed vaadeldavate objektide parameetrite hindamise seisukohalt võimalikult kasulikuks, rakendatakse mitmesuguseid satelliidisensorite kalibreerimise meetodeid [2]. Üks neist on veekogude värvuse vikaarkalibreerimine [3], mille käigus luuakse atmosfäärialuste mõõtmiste kaudu usaldusväärne tugiskaala. Tänu sünkroonselt tehtud lokaalsetele atmosfäärialustele mõõtmistele, mis vaadeldavate objektide parameetrite hindamise seisukohalt on oluliselt täpsemad, võimaldab see meetod suuremahulisi satelliidiandmeid tugiskaala alusel üldiselt kohandada ja korrastada. Tugimõõtmiste süsteemi usaldusväärsus sõltub eelkõige lokaalsete sensorite metrooloogilisest tasemest ja sobivusest ettenähtud rakendusteks, tugiparameetrite mõõtemetoditest, sensorite kalibreerimiseks kasutatavate laborite võimekusest ja tegelikust kalibreerimiste ning võrdlusmõõtmiste praktikast. Tugimõõtmiste süsteemi rakendamisel satelliidisensorite andmetele on oluline osa atmosfäärimudelil, mis arvestab kiirguse levimist maapinnale ja tagasi satelliidisensorile.

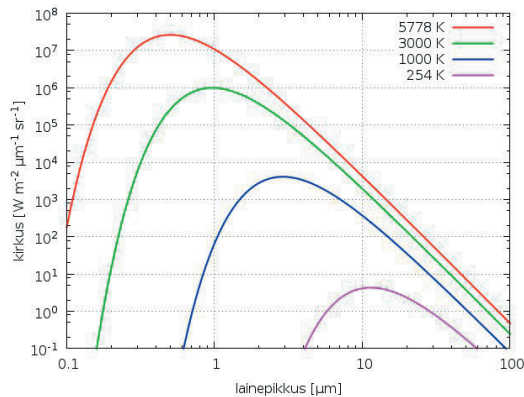
Kuna atmosfääri kohal mõõdetava summaarse kirkuse signalist umbes 90% on põhjustatud atmosfäärist ning veest väljuva kiirguse kirkuse osakaal on isegi alla 10%, siis suhe 1:10 iseloomustab ka mõõtemääramatusi: kui satelliidi sensorite määramatus on 1% tasemel, siis ainult orbiidil mõõdetud summaarse kirkuse signaali alusel määratud veest väljuva kiirguse kirkuse määramatus oleks 10% tasemel. Rakendades maapealse usaldusväärse tugiskaala toel vikaarkalibreerimist, on võimalik satelliidiandmete kasutamise efektiivsust ja hinnangute määramatust oluliselt parandada.

NASA merebioloogia töörühm (OBPG) arendas välja nn vikaarkalibreerimise meetodi [4], mille abil veest väljuva kiirguse kirkuse satelliidisensoriga mõõdetud ning atmosfääriparandiga täpsustatud tulemused seati väga lähedasse kooskõlla vahetult veepinna kohal tehtud „täpsete“ mõõtmiste tulemustega. Meetodit rakendati satelliidi SeaWiFS andmetele Vaikse ja India ookeani lõunapiirkonnast, kasutades meremõõteplatvormi (MOBY) andmeid ja teisi satelliidi vaatluspiirkonna selge veega kohtades tehtud sõltumatuid tugimõõtmisi. Meetod modifitseeris atmosfääriparandi arvutamise viisi ja seadis selle abil kooskõlla satelliidisensori ja atmosfäärialuste mõõtmiste tulemused. Selgus, et vikaarkalibreerimise tulemuste aegrea keskmistamisel saabus üsna kiiresti satelliidisensori ja veepinnal eri kohtades ja ajal tehtud mõõtmiste hea kooskõla. Algselt väljapoole $\pm 1\%$ vahemikku jäänud vikaarkalibreerimise tegurid koondusid juba paarikümne mõõtettsükli keskmistamisel $\pm 0,1\%$ piirkonda, muutusid stabiilseks ega sõltunud oluliselt mõõtekohast. Lokaalsete tugimõõtmiste määramatus saavutas satelliidi vikaarkalibreerimisel modifitseeritud mõõteandmete määramatuse hinnangu seega domineeriva osa.

Sensorite kalibreerimise metrooloogilised probleemid

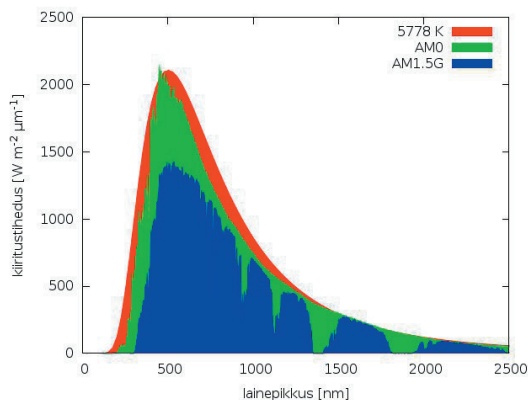
Orbiidilt seiratavate maapealsete objektide spektroskoopia ja radiomeetria metrooloogilised probleemid tulenevad loodusliku, põhiliselt Päikese kiirguse intensiivsuse ja spektraalse koostise erinevusest võrreldes kiirgusallikatega, mida kasutatakse radiomeetrialaborites etalonidena sensorite ja radiomeetrite kalibreerimiseks (absoluutselt mustad kehad ja volfram-kvarts-halogeenlambid)[5]. Atmosfäärist

mõjutamata päikesekiirguse efektiivseks kirjeldamiseks sobib samade mõõtetega absoluutselt must keha, mille temperatuur on 5778 K. Samas jääb volfram-kvarts-halogeenlambi ja kõrgtemperatuurse absoluutselt musta keha töötemperatuur kõigest 3000 K kanti. Joonis 2 näitab absoluutselt musta keha kiirgusspektri sõltuvust temperatuurist vastavalt Plancki kiirgusseadusele. Päikese ja spektraallambi kirkus võivad olenevalt lainepikkusest erineda mitme suurusjärgu võrra.



Joonis 2. Absoluutselt musta keha kiirgusspektri sõltuvus temperatuurist: Päike 5778 K, lamp 3000 K, lõkketuli 1000 K, Maa soojuskiirgus 254 K.

Selline suur erinevus raskendab sensorite radiomeetrilist kalibreerimist etalonlambi abil: kalibreerimisallika kiirgusspektri tõttu on sensorite spektraalse tundlikkuse määramatus UV-piirkonnas märgatavalt suurem kui nähtavas ja lähinfrapunapiirkonnas. Oluliseks muutub sensori lineaarsuse kindlustamine mitme suurusjärgu ulatuses, mis kataks nii kalibreerimis- kui ka välimõõtmiste piirkonna. Radiomeetri hajuvalgus võib moonutada või takistada mõõtmisi intensiivsete kiirgusjoonte ja -ribade naabruses, mis muudab vajalikuks keerukad katsetused haj valguse panuse hindamiseks ja selle tekitatud moonutuste kõrvaldamiseks.

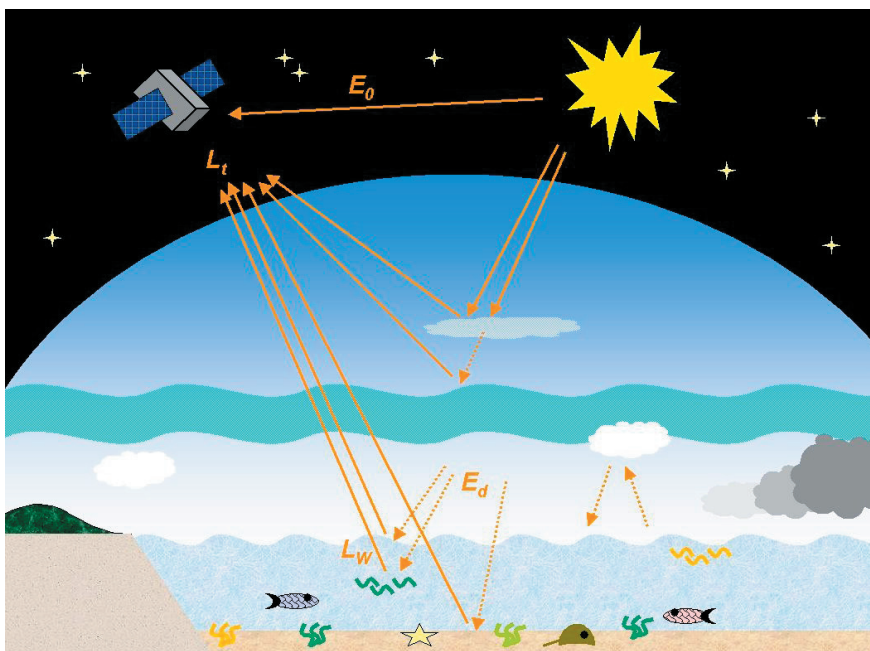


Joonis 3. Päikese kiirgus absoluutselt musta keha lähenduses (punane) ning Päikese tegelik kiirgus mõõdetuna väljaspool atmosfääri maalähedasel orbiidil (AM0 – roheline) ja Maa pinnal (AM1.5G – sinine).

Teiseks oluliseks määramatuse põhjuseks satelliidiandmete kasutamisel on atmosfääri neeldumise ja hajumise mõju kiirguse levimisel Päikeselt Maale ja Maalt peegeldunud, hajunud ja tekkinud kiirguse levimisel tagasi vaatlusorbiidile, vt joonis 3 ja 4. Kiirgus lainepikkusega alla 300 nm osoonikihis neeldumise tõttu Maa pinnale praktiliselt ei jõua, tugevasti nõrgeneb spektri sinine äär. Kõrge ruumilise lahutusega seiresatelliit WorldView-2 mõõtis Järvselja katseala peegeldusetaloni spektraalset heledust 2013. aasta suvel [1]. Lainepikkustel üle 600 nm on satelliidipildilt määratud etaloni peegeldusspekter rahuldavas kooskõlas kohapeal mõõdetud spektriga, kuid lühematel lainepikkustel erinevus üha kasvab. See tulemus iseloomustab hästi atmosfääri segavat mõju satelliidisensorite abil kogutud info kasutamisele atmosfääri all asuvate objektide kirjeldamiseks.

Vaatlusprotsessi komplitseerib kiirgusallika ja seiresatelliidi asukoha (atmosfääri-kihi efektiivse paksuse) pidev muutumine ja keerukas ilmadünaamika, mis võib ka usaldusväärsete lokaalsete mõõteandmete kogumise teha raskeks või isegi võimatuks. Päikesekiirgus jaguneb otsekiirguseks, mis levib selge ilmaga praktiliselt paralleelsete kiirtena, hajuskiirguseks, mis saabub pilvedelt ja mujalt atmosfäärist, ning aluspinnalt peegeldunud kiirguseks. Atmosfääri kohal mõõdetava summaarse kirkuse $L_t(\lambda)$ mudel võtab arvesse mitmesuguseid kiirguse levimise, hajumise ja neeldumise seotud efekte, vt joonis 4 [3], [4], [6], [7]:

$$L_t(\lambda) = [L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + t_{d_v}(\lambda) L_f(\lambda) + t_{d_v}(\lambda) L_w(\lambda)] t_{g_v}(\lambda) t_{g_s}(\lambda). \quad (1)$$



Joonis 4. Vee kirkuse mõõtmine satelliidilt. Kiirguse levimine Päikeselt: atmosfääriväline otsekiirguse kiiritustihedus E_0 , veepinnale langeva kiirguse kiiritustihedus E_d , satelliidi-sensori suunal veest välja juuva kiirguse kirkus L_w ja sensori poolt registreeritav summaarne atmosfääriväline kirkus L_t .

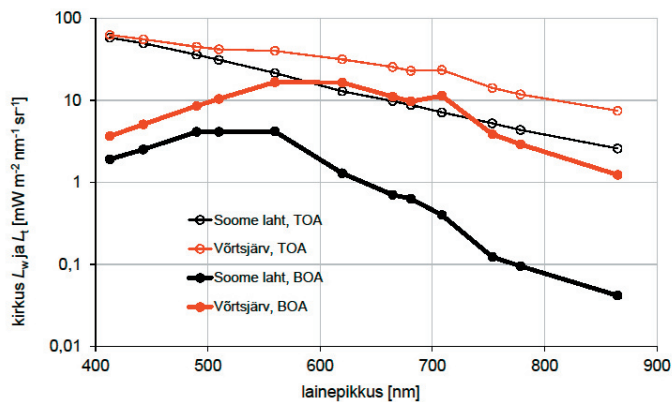
Siin $L_r(\lambda)$, $L_a(\lambda)$ ja $L_f(\lambda)$ on kirkuse komponendid, mis annavad vastavalt Rayleigh' hajumise, atmosfääriaerosooli ning lainetuse ja pinnavahu panuse. Kiirguse levimist maapinnalt satelliidisensorini iseloomustab atmosfääri difuusne läbilaskvus $t_{d_v}(\lambda)$, atmosfääri gaasilist neeldumist otsekiirguse teel Päikeselt Maani iseloomustab $t_{g_v}(\lambda)$ ja maapinnalt satelliidi sensorini $t_{g_s}(\lambda)$. Puudub Päikese kiirguse otsepeegeldunud komponent, kuna otsepeegeldust sisaldavad pikslid eemaldatakse mõõtetulemustest andmete esmase filtreerimise käigus. Valemi (1) liikmete $L_r(\lambda)$, $L_a(\lambda)$ ja $L_f(\lambda)$ määramist on kirjeldatud arvukates publikatsioonides, mille viited võib leida artiklites [3], [4], [6], [7].

Veest väljuva kiirguse kirkus $L_w(\lambda)$ on keskne suurus orbiidil mõõdetud summaarse kirkuse $L_t(\lambda)$ „kalibreerimisel“ ehk tugiväärtuste arvutamisel. Suurust $L_w(\lambda)$ mõjutab tugevasti vee puhtus ja veekogu sügavus: veest väljuva kiirguse kirkus võib võrreldes maapinnalt peegeldunud kiirguse kirkusega olla rohkem kui suurusjärgu võrra väiksem.

Et võtta arvesse atmosfääriparandit, asendatakse avaldises (1) tundmatu $L_w(\lambda)$ vahetult maapinnal mõõdetud „täpse“ väärtusega ja orbiidil mõõdetud väärtuse $L_t^{mõõd}(\lambda)$ asemel arvutatakse nn vikaarväärtus $L_t^{vik}(\lambda)$. Arvutatud ja satelliidilt mõõdetud väärtuste suhtest saadakse skaalategurid g_λ , mille abil ongi võimalik kindlustada kooskõla orbiidil mõõdetud ja vahetult veepinnal määratud väärtuste vahel [6]:

$$g_\lambda = \frac{L_t^{vik}(\lambda)}{L_t^{mõõd}(\lambda)} \quad (2).$$

Üksikmõõtmiste puhul koonduvad mõne protsendi tasemel korduvusega vikaar-kalibreerimise tegurid stabiilse tugiobjekti ja stabiilsete võrreldavate mõõtesensorite korral kiiresti oluliselt kitsamasse piirkonda. Selle tõttu domineerib satelliidi vikaarkalibreerimisel modifitseeritud mõõteandmete määramatuse hinnangus sageli ülekaalukalt atmosfäärialuste tugimõõtmiste määramatus.



Joonis 5. Atmosfääri mõju vee kirkuse mõõtmisele: satelliidisensori poolt väljaspool atmosfääri mõõdetud summaarne kirkus L_t ja atmosfäärialune veest väljuv kirkus L_w (TOA – top of atmosphere, BOA – below of atmosphere).

Atmosfääri mõju vee kirkuse mõõtmisele satelliidisensori MERIS andmete alusel illustreerib joonis 5. Tulemused iseloomustavad kiirguse peegeldumist vee pinnalt Soome lahes ja Võrtsjärvel 5. juulil 2006. a. Satelliidi abil mõõdetud summaarne kirkus L_t erineb neil veekogudel joonise poollogaritmilise mastaabi tõttu suhteliselt vähe. Veest väljuv kirkus maapinnal L_w on Võrtsjärvel märgatavalt suurem: see on tingitud kõnealuste veetüüpide olulisest erinevusest ja näitab muidugi ka kaugseire võimekust vees leiduvate optiliselt aktiivsete ainete sisalduse määramisel. Võrreldes ookeaniga on siseveekogude kirkus märksa suurem. Näiteks Võrtsjärve kirkus ületab sinise ookeani kirkust spektri punases osas umbes 30 ja lähiinfrapunases piirkonnas enam kui 100 korda.

Tugimõõtmiste usaldusväärsus

Tugiskaala andmete lokaalsel mõõtmisel kasutatakse mitmeid radiomeetrilisi meetodeid [3], [8], [9], mis hõlmavad veepealseid mõõtmisi [10], [11], muuhulgas veest väljuva kiirguse kirkuse $L_w(\lambda)$ ja erineval sügavusel vees tehtud $L_u(\lambda)$ mõõtmisi [12], [13], mille puhul tulemus ekstrapoleeritakse nullsügavusele ehk vee-pinnale. Kõigi nende meetodite puhul on mõõteseadmete korrektne radiomeetriline kalibreerimine nende SI-jälgitavuse seisukohalt erakordselt tähtis.

Tartu Observatooriumi optikalabori mõõte- ja katsevõimekuse väljaarendamisel [5] on silmas peetud vajadusi maapealseteks radiomeetristeks välimõõtmisteks, mis muu hulgas toetaksid ka kaugseiremõõtmisi. Kuid kalibreerimise panus moodustab radiomeetriste välimõõtmiste liitmääramatusest vähem kui poole. Mõõteseadmete toimimise, välimõõtmise protseduuri, seadmete ülesseadmise ja keskkonnaefektide panus võib kalibreerimisega seotud määramatuse panust oluliselt ületada. Seetõttu on tugiskaala andmete kvaliteedi seisukohalt seadmete korrapärase kalibreerimise kõrval vähemalt sama tähtis erinevate mõõtjate kooskõla hindamine võrdlusemõõtmiste abil ja välimõõtmisteks kasutatavate seadmete igakülgne laboratoorne katsetamine. Kitsaskohtade ilmnemisel on tarvilik ka seadmete mõõtetehniline edasiarendamine. Eelkõige vajab parandamist radiomeetrite spektraalne ning radiomeetriline lahutusvõime, radiomeetriline lineaarsus ja tundlikkus. Paljude rakenduste seisukohalt on tarvilik vähendada hajuvalguse taset ning parandada seadmete ajalist ja temperatuurilist stabiilsust. Probleeme võib põhjustada pimesignaali salvestamise protseduur ja radiomeetri sisendoptika. Andmete kvaliteeti aitab tagada portatiivne välimõõtmisteks sobiv stabiilne kalibreerimisallikas, mis võimaldab hinnata seadmete stabiilsust ja kalibreerimisseisukorda välitööde jooksul.

Üheks usaldusväärse tugiskaala mõõtemääramatuse komponendiks on eri paigus ja ajal kasutatud seadmete omavaheline kooskõla. Välimõõtmisteks kasutatavate seadmete ja meetodite ekvivalentsust on võimalik hinnata võrdlusemõõtmiste abil. Võrdlusemõõtmiste paremaks korraldamiseks väljaspool laboratooriumi on suureks abiks nn tugiradiomeeter, mille metrooloogilised parameetrid ja stabiilsus ületavad välimõõtmistel laialt kasutusel olevate radiomeetrite omi. Erinevaid mõõtevahendeid ja -meetodeid hõlmavad võrdlusemõõtmised on asendamatult vahend mõõtetulemuste kooskõla, määramatuse hinnangute adekvaatsuse, mõõteprotseduuride ja andmetöötluse parandamiseks.

Tartu Observatooriumi teadlased osalevad ESA projekti FRM4SOC raames rahvusvahelises meeskonnas, kes töötab satelliitkaugseire mõõtmiste usaldusväärsuse tagamise nimel. Tartu Observatooriumi partneriteks on National Physical Laboratory ja Plymouth Marine Laboratory Ühendkuningriigist, Royal Belgian Institute of Natural Sciences Belgiast ning tunnustatud firma ACRI-ST Prantsusmaalt [14]. Plaanis on mitmed võrdlusmõõtmised nii Tartu Observatooriumi optikalaborites kui ka väli-tingimustes Kääriku järvel, Vahemerel ja Atlandi ookeanil.

Vikaarkalibreerimist toetav maapealne tugisüsteem peab kasutama parimaid kättesaadavaid välimõõtmiste ja andmehõivemeetodeid ning kvaliteedi kindlustamise skeeme, muutmaks radiomeetriliste tulemite määramatused nii väikeseks kui võimalik [3]. Näiteks suuruse $L_w(\lambda)$ määramatuse sihtväärtused ei tohi ületada (3–4)% spektri sinises ja rohelises ning 5% punases piirkonnas. Et kindlustada täpset võrdlust kõikide satelliidisensorite mõõteribade keskmistel lainepikkustel, peab tugimõõtmisel kasutatava radiomeetri spektraalne lahutusvõime olema parem kui 1 nm. Radiomeeter peab olema kalibreeritud SI-jälgitavas laboris, kirkuse määramatuse sihtväärtused olema alla 2% ja stabiilsus parem kui 0,5%. Vajalikud on mõõtetehnilised katsetused radiomeetrilise lineaarsuse, temperatuuri- ja polarisatsioonitundlikkuse ning hajuvalguse efektide kirjeldamiseks ja arvesse võtmiseks. Tugimõõtmiste kvaliteedisüsteem peab kindlustama seadmete täpse ülesseadmise ja regulaarse ülevaatamise välimõõtmistel, et vähendada või elimineerida ümbritseva keskkonna võimalikke häirivaid mõjusid: infrastruktuuri varju jäämist radiomeetri vaatevälja, tuule-lainetuse efekte, sisendoptika saastumist. Sellised on eeldused radiomeetriliste andmete stabiilsuse ja pikaajalise täpsuse kindlustamisel. Andmete kogumise sagedus peab võimalust mööda toetama kõiki piirkonnast üle lendavaid veeseiresatelliite.

Kokkuvõte

Maapealsed tugimõõtmised kui vikaarkalibreerimise lahutamatu osa tagavad Maa seiresatelliitide andmete efektiivse kasutamise. Vikaarkalibreerimine ei tähenda satelliidisensorite absoluutset radiomeetrilist kalibreerimist, kuid soodsates tingimustes kindlustab see satelliidiandmetest leitud suurusele $L_w(\lambda)$ määramatuse, mille põhilise panuse annab vikaarkalibreerimist kindlustava maapealse $L_w(\lambda)$ tugimõõtmise määramatus. See saavutatakse $L_w(\lambda)$ arvutamisel, kui hästikalibreeritud ja püsivalt kontrollitud satelliidisensorite abil atmosfääri kohal määratud $L_T(\lambda)$ väärtusi justeeritakse vikaar-g-tegurite abil. Süsteemi latusaks toimimiseks peaks pidevalt käigus hoidma vähemalt ühte lokaalset radiomeetriliste tugimõõtmiste jaama, mis kindlustaks parima võimaliku mõõtemääramatuse ja lubaks aja jooksul optimeerida tugiskaala g-tegurite väärtusi. Äärmiselt oluline on muidugi ka adekvaatsete atmosfäärimudelite rakendamine, mis peaks tagama eri missioonide ja asukohtade jaoks arvutatud tulemuste omavahelise kooskõla.

Vikaarkalibreerimist toetav maapealne tugisüsteem peab kasutama parimaid kättesaadavaid välimõõtmiste ja andmehõivemeetodeid ning kvaliteedi kindlustamise skeeme, et muuta arvutatud radiomeetriliste tulemite määramatus nii väikeseks kui võimalik.

Radiomeeter peab olema kalibreeritud SI-jälgitavas laboris, läbinud igakülgset mõõtetehnilised katsetused, omama piisavat spektraalset lahutusvõimet ja kindlustama oma mõõtmissagedusega võimaluse korral kõiki piirkonnast üle lendavaid vee-seiresatelliite. Tartu Observatooriumi teadlased osalevad ESA projekti FRM4SOC raames aktiivselt rahvusvahelises koostöös selle valdkonna arendamisel.

Viidatud kirjandus

- [1] Kuusk, A. (2014). Kaugseire radiomeetria. Kaugseire Eestis 2014. Artiklikogumik, Tartu Observatoorium ja Keskkonnaagentuur, Tallinn, 2014, pp. 175–181.
- [2] Chander, G., Hewison, T. J., Fox, N., Wu, X., Xiong, X., and Blackwell, W. J. (2013). Overview of Intercalibration of Satellite Instruments. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 51, no. 3, pp. 1056–1080, Mar. 2013.
- [3] Zibordi, G., Mélin, F., Voss, K. J., Johnson, B. C., Franz, B. A., Kwiatkowska, E., Huot, J.-P., Wang, M. and Antoine, D. (2015). System vicarious calibration for ocean color climate change applications: Requirements for in situ data. *Remote Sens. Environ.*, vol. 159, pp. 361–369, Mar. 2015.
- [4] Franz, B. A., Bailey, S. W., Werdell, P. J. and McClain, C. R. (2007). Sensor-independent approach to the vicarious calibration of satellite ocean color radiometry. *Appl. Opt.*, vol. 46, no. 22, pp. 5068–5082, Aug. 2007.
- [5] Kuusk, J., Ansko, I. and Vendt, R. (2014). Tartu Observatooriumi optikalabori võimekus kaugseirerakendusteks. Kaugseire Eestis 2014. Artiklikogumik, Tartu Observatoorium ja Keskkonnaagentuur, Tallinn, 2014, pp. 192–200.
- [6] Bailey, S. W., Hooker, S. B., Antoine, D., Franz, B. A. and Werdell, P. J. (2008). Sources and assumptions for the vicarious calibration of ocean color satellite observations. *Appl. Opt.*, vol. 47, no. 12, pp. 2035–2045, Apr. 2008.
- [7] Wang, M. (2002). The Rayleigh lookup tables for the SeaWiFS data processing: Accounting for the effects of ocean surface roughness. *Int. J. Remote Sens.*, vol. 23, no. 13, pp. 2693–2702, Jan. 2002.
- [8] Zibordi, G. and Voss, K. J. (2014). Chapter 3.1 - In situ Optical Radiometry in the Visible and Near Infrared in Experimental Methods in the Physical Sciences, vol. 47, C. J. D. and A. C. P. Giuseppe Zibordi, Ed. Academic Press, 2014, pp. 247–304.
- [9] MERIS Optical Measurement Protocols Part A: In-situ water reflectance measurements, CO-SCI-ARG-TN-008 Issue 2.0. ESA/ARGANS, Aug-2011.
- [10] Zibordi, G., Melin, F., Hooker, S. B., D'Alimonte, D. and Holben, B. (2004). An autonomous above-water system for the validation of ocean color radiance data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 42, no. 2, pp. 401–415, Feb. 2004.
- [11] Ruddick, K. G., De Cauwer, V., Park, Y.-J. and Moore, G. (2006). Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance: The similarity spectrum for turbid waters. *Limnol. Oceanogr.*, vol. 51, no. 2, pp. 1167–1179, Mar. 2006.

- [12] Zibordi, G., D'Alimonte, D. and Berthon, J.-F. (2004). An Evaluation of Depth Resolution Requirements for Optical Profiling in Coastal Waters. *J. Atmospheric Ocean. Technol.*, vol. 21, no. 7, pp. 1059–1073, Jul. 2004.
- [13] Moore, G. F., Icely, J. D. and Kratzer, S. (2010). Field Inter-Comparison and Validation of In-Water Radiometers and Sun Photometers for MERIS Validation in Field Inter-comparison and validation of in-water radiometer and sun photometers for MERIS validation, *Proceedings of the ESA Living Planet Symposium*, Bergen, Norway, 2010, vol. 686, p. 342.
- [14] FRM4SOC [Online]. (2016). Available: <https://frm4soc.org/>. [Accessed: 04-Oct-2016].

Fiducial reference measurements for Earth observatorion

Summary

In situ reference measurements are integral part of vicarious calibration of satellite measurements and allow effective use of Earth observation data. Vicarious calibration does not provide absolute calibration coefficients for the satellite sensor, but in favourable conditions it provides uncertainty for derived from satellite measurements which is mainly determined by the uncertainty of the in situ reference measurement. This is achieved by adjusting the measured top-of-atmosphere values by vicarious gain factors when values are calculated. For effective operation of the system at least one permanent in situ reference site should be maintained which provides best possible measurement uncertainty and allows optimization of the vicarious gain factors in the course of time. Equally important is the use of proper atmospheric correction models that should ensure the consistency of results measured at different locations and by various satellite sensors. The scientists of Tartu Observatory are actively contributing in this field by leading the international consortium of the FRM4SOC project funded by the European Space Agency.

Järvelja peegeldusetalon

Andres Kuusk¹, Joel Kuusk¹, Mait Lang^{1,2}

¹ Tartu Observatoorium, Tõravere, Nõo vald, 61602 Tartumaa

² Eesti Maaülikool, metsandus- ja maaehitusinstituut, Kreutzwaldi 5, 51014 Tartu

Kokkuvõte

Järvelja Õppe- ja Katsemetskonna territooriumile rajas Tartu Observatoorium sealsete metsade satelliidi- ja lennukimõõtmiste toeks peegeldusetaloni. See on ilma mõjude eest nihutatava katusega kaitstud 10-meetrine horisontaalne halliks värvitud betoonplaat. Plaadi peegeldusomadused on detailselt mõõdetud, leitud on analüütilised lähendid peegeldusindikaatorisse kirjeldamiseks suures seniitnurkade vahemikus. Peegeldusetalon aitab oluliselt tõsta Eesti Keskkonnaobservatooriumi SMEAR-jaama ümbritseva maastiku peegeldusomaduste mõõtmise metrooloogilist kvaliteeti. Järvelja Õppe- ja Katsemetskond on ka mitmete satelliidimõõtmiste tugiala, rajatud peegeldusetalon aitab tagada satelliidimõõtmiste toeks tehtavate atmosfäärialuste spektraalmõõtmiste kvaliteeti.

Võttesõnad: kaugseiresensorite kalibrimine, peegeldusetaloni optilised omadused

Sissejuhatus

Järvelja metsade kohal läbiviidavate optilise kaugseire spektraalmõõtmiste kalibrimiseks on vaja tuntud peegeldusomadustega objekti, mis oleks piisavalt suur, et seda saaks mõõta lennukelt, ning oleks korrektselt eristatav ka kõrge ruumilise lahutusega satelliidipildidel. Eestis ei ole ühtegi looduslikku ega ka muuks otstarbeks rajatud tehisobjekti, mille peegeldusomadused püsiksid muutumatud.

Joonisel 1 on näiteks Raadi kunagise lennuvälja betoonrada. Selle optilised omadused muutuvad sõltuvalt kasutuskooormusest ja ilmatingimustest. Sellepärast rajas Tartu Observatoorium Järveljale spetsiaalse peegeldusetaloni, mis on mõjude eest kaitstud kõrvale nihutatava katusega.

Ehituse peatöövõtja oli AS Cobra Grupp, katuse ehitas Märja Tehno OÜ. Ehitust finantseeris Euroopa Regionaalarengu Fond. Peegeldusetaloni andis ehitaja üle 1. oktoobril 2010.



Joonis 1. Raadi lennuväli. Margus Ansu foto, Tartu Postimees, 10.04.2007.

Peegeldusetaloni asukoht

Peegeldusetalon asub Järveljal jahilossi ja Selgjärve lähedal lagendikul, joonis 2.



Joonis 2. Peegeldusetaloni asukoht.

Etaloni nurkade koordinaadid L-Est 97 süsteemis on

X	Y
6463401.59	693837.01
6463400.20	693846.91
6463390.31	693845.53
6463391.69	693835.63

Tsentri koordinaadid:

X = 6463395.95, Y = 693841.27
B: 58° 16' 5.98", L: 27° 18' 15.43"

Kõrgus merepinnast 38.74 m.

Etalonplaadi keskkohast vaadates on taevafäär avatud enamikus suundades rohkem kui 80° seniidist, ainult lähedal kasvavad püramiidtamm ja mõned kased ulatuvad $15\text{--}20^\circ$ horisondist. Horisondi kaetus on näha poolsfäärifotol joonis 3.



Joonis 3. Horisondi kaetus,
10. november 2010.

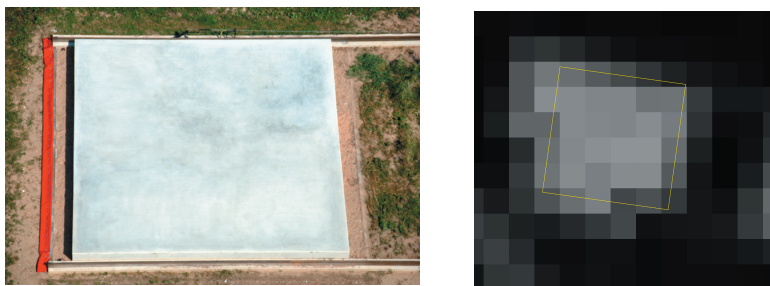
Peegeldusetaloni kirjeldus

Peegeldusetalon on rangelt horisontaalne 10×10 m betoonist plaat, maapinnast umbes 70 cm kõrgusel, et lume sulamise vesi ei valguks plaadile. Ilma mõju ja tolumumise eest on etalon kaitstud katusega, mis nihutatakse kõrvale ainult mõõtmiste ajaks. Kõrvale nihutatud katus ei varja plaadi üheski punktis horisonti rohkem kui 10° kõrguselt.



Joonis 4. Helikopterimõõtmisteks avatud etalon 27. juulil 2011.

Algselt oli etaloni pind lihvitud betoon. Betoon on neutraalselt hall ning lihvituna väga matt. Kahjuks ei suutnud ehitaja tagada betooni ühesugust heledust kogu plaadi ulatuses, joonis 5. Mõnel valguse lainepikkusel ületas heleduse muutlikkus 20%. See oli nähtav ka kõrge ruumilise lahutusega satelliidifotol, joonis 5 paremal. Sellepärast värvisime etaloni 2014. aastal halli mati värviga. Nüüd ei ületa etaloni välja ebaühtlus 1%.

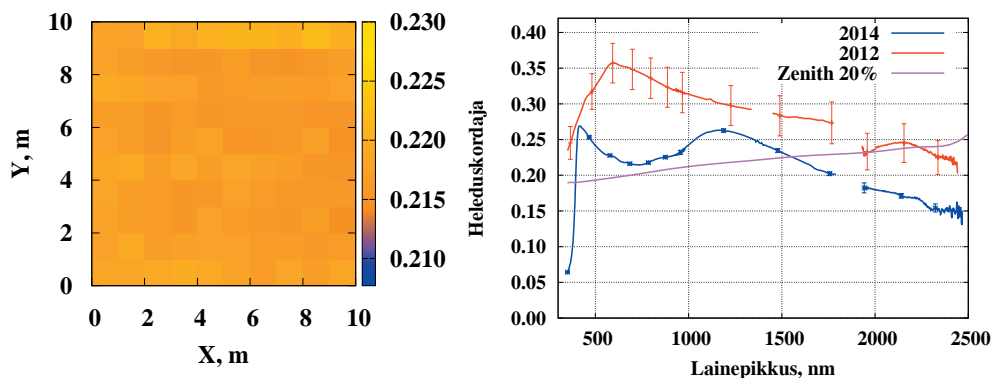


Joonis 5. Foto helikopterilt 27. juulil 2011 (vasakul) ja peegeldusetaloni satelliidisensori WorldView-2 punasel spektraalpildil (608 nm) 29. juulil 2013 (paremal). Satelliidipildi piksli suurus on 2 m.

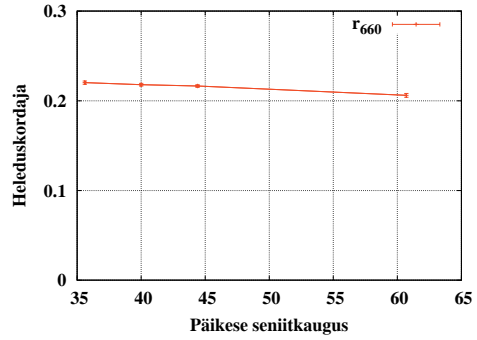
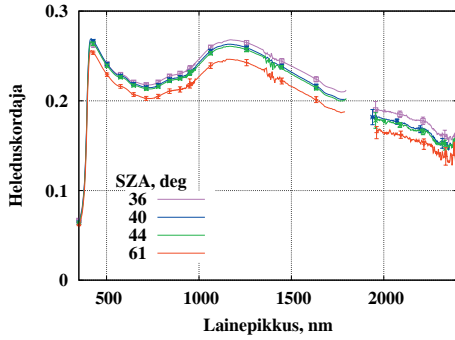
Optilised omadused

Etaloni peegeldusspekter vertikaalsuunas vaadatuna on kaardistatud etalonil kõndides spektromeetriga SVC HR-1024 (SVC, 2008) 1-meetrise sammuga. Joonisel 6 on vasakul värvitud etaloni peegeldusteguri kaart punases valguses (675 nm) ja paremal keskmine peegeldumisspekter enne ja pärast värvimist koos standardhälbega. Värvitud etaloni peegeldusteguri ebaühtlus on nii väike, et standardhälve mahub graafikul joone jämeduse sisse. Võrdluseks on graafikul firma SphereOptics halli (20%) 1-meetrise Zenith Alucore peegeldusetaloni peegeldusspekter.

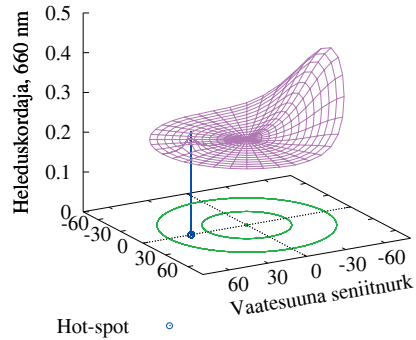
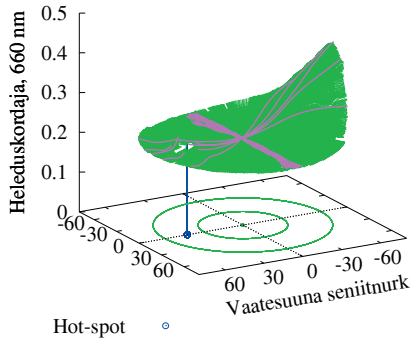
Peegeldumisindikaator on mõõdetud statiivilt lennukispektromeetri UAVSpec3 BRF-sensoriga (Kuusk, 2011).



Joonis 6. Paneeli heleduse kaart (675 nm) ning keskmine spektraalne heleduskoefitsient ja selle standardhälve nadiiris enne ja pärast etaloni värvimist. Zenith 20% on firma SphereOptics 1-meetrise Zenith Alucore peegeldusetaloni peegeldusspekter.



Joonis 7. Peegeldumisspekter erinevatel päikese seniitnurdadel ja 660 nm heleduskordaja olenevus päikese seniitnurgast.



Joonis 8. Mõõdetud peegeldumisindikatriss lainepikkusel 660 nm ja selle analüütiline lähend, 11.07.2014, $\theta_s = 43^\circ$.

Värvitud peegeldusetaloni heledus üle kogu etaloni pinna muutub umbes 0,6%, aga heleduse kasv peegelsuunas võrrelduna vertikaalsuunaga on oluliselt suurem kui lihvitud betoonil. Päikese seniitnurgal umbes 40° on etalon peegelsuunas peaaegu kaks korda heledam kui nadiiris. Peegeldusindikatriss on suures seniitnurdade vahemikus lähendatav funktsiooniga

$$r(\theta, \phi) = r_0 (1 + r_{spec}(\theta, \phi) + r_{hs}(\theta, \phi)), \quad (1)$$

kus r_0 on paneeli heleduskordaja nadiiris, $r_{spec}(\theta, \phi)$ on peegelkomponent ja $r_{hs}(\theta, \phi)$ on opositsiooniefektist tingitud heleduse kasv päikese suunale vastassuunas, nn „pühasära“ ehk nimbus.

$$\text{Peegelsuuna poolruumis } r_{spec}(\theta, \phi) = a_1 \exp(-a_2(\theta - \theta_{mirr})^2) \exp(-a_3(\phi - 180)^2).$$

$$\text{Tagasipeegelduse poolruumis } r_{hs}(\theta, \phi) = a_4 \exp(-a_5 \sqrt{(\theta - \theta_{mirr})^2 + \phi}).$$

θ ja ϕ on vaatesuuna seniitnurk ja suhteline asimuut – nurkkaugus päikese asimuudist, θ_s on päikese seniitnurk, a_1, \dots, a_5 on konstandid. Lainepikkusel 660 nm ja päikese seniitnurgal $\theta_s = 43^\circ$ $r_0 = 0.215$, $\theta_{mirr} = 70^\circ$, $a_1 = 0,92$, $a_2 = 1/1200$, $a_3 = 1/1550$, $a_4 = 0,22$, $a_5 = 0,25$.

25. juulil 2014 pildistas Jānis Mucenieks etaloni noolkraanalt ja multikopterilt. RGB-piltide R-komponendilt mõõdetud nimbuse profiilid on joonisel 9.

4. juulil 2015 on etalon kaardistatud ja indikatriss mõõdetud päikese seniitnurgal 35,5°. Välja ebaühtlus on sarnane 11.07.2014 mõõdetule.

Peegeldusindikatrissi lähendusvalemi (1) parameetrid on $r_{spec}(\theta, \phi) = a_1 r_{fr} \exp(-a_2(\theta - \theta_{mirr})^2) \exp(-a_3(\phi - 180)^2)$, $\theta_s = 35,5^\circ$, $r_0 = 0,217$, $\theta_{mirr} = 60^\circ$, $a_1 = 1,4$, r_{fr} - Fresneli peegeldustegur murdumisnäitaja $n = 1,5$ korral, $a_2 = 1 / 1200$, $a_3 = 1 / 1550$, $a_4 = 0,22$, $a_5 = 0,25$.

Rajatud peegeldusetalon on optiliselt stabiilne detailselt uuritud peegeldusomadustega objekt, mis aitab oluliselt tõsta Eesti Keskkonnaobservatooriumi SMEAR-jaama ümbritseva maastiku peegeldusomaduste mõõtmise metrooloogilist kvaliteeti. Järvelja Öppe- ja Katsemetskond on ka mitmete satelliidimõõtmiste tugiala, rajatud peegeldusetalon aitab tagada satelliidimõõtmiste toeks tehtavate atmosfäärialuste spektraalmõõtmiste kvaliteeti.

Tänuavaldused

Käesolevat tööd on toetanud Eesti Teadusagentuur, uurimistoetus SF0180009Bs11. Peegeldusetaloni ehitust finantseeris Euroopa Regionaalarengu Fond. Ehituse peatöövõtja oli AS Cobra Grupp, etaloni eskiisprojekti tegi ja projekteeris ning ehitas Märja Tehno OÜ. Valmis etaloni mõõdistas OÜ Avek Maa, Raadi lennuvälja pildistas Margus Ansu ning etaloni pildistas noolkraanalt ja multikopterilt Jānis Mucenieks – täname.

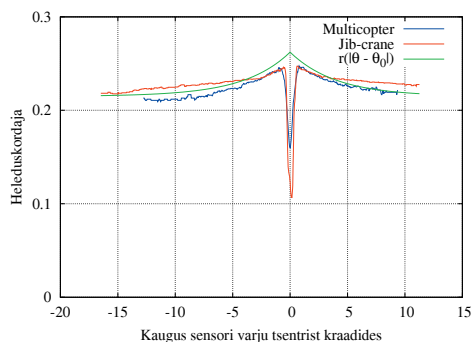
Viidatud kirjandus

Kuusk, J. (2011). Measurement of forest reflectance. Top-of-canopy spectral reflectance of forests for developing vegetation radiative transfer models. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Germany.

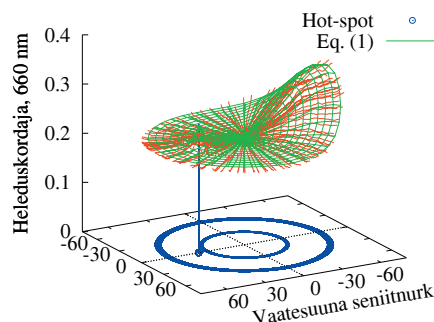
Minnaert, M. (1976). Valgus ja värv looduses. Valgus, Tallinn.

SMEAR-Estonia. (2015). <http://smear.emu.ee/>.

HR-1024 Data Sheet. (2008). <http://www.spectravista.com/brochure/SVCHR1024i.pdf>.



Joonis 9. Nimbuse profiil, $\theta_s \approx 60^\circ$.



Joonis 10. Mõõdetud peegeldusindikatriss lainepikkusel 660 nm ja selle analüütiline lähend, 4.07.2015, $\theta_s = 35^\circ$.

The reference reflectance panel at Järvelja

Summary

A special reflectance panel for the support of airborne and high resolution satellite measurements was built at the Järvelja Experimental Forestry station. The panel is a 10 x 10 m concrete plate painted grey. Reflectance of the panel is about 20%. The panel is protected by a movable roof and opened only for measurements. Optical properties of the panel have been carefully studied. The spectral reflectance of the panel is in the range 0.15-0.27 within the wavelength range 400-2400 nm. Spatial variability of nadir reflectance of the panel does not exceed 1%. Angular distribution of panel directional reflectance is modelled by an analytical function Eq. (1) in the range of zenith angles 0-80°. The panel is optically stable, providing possibilities for calibrating airborne spectroscopic measurements of forests around the SMEAR tower of the Estonian Environmental Observatory and improving the radiometry of spectroscopic measurements below the atmosphere for the support of satellite remote sensing measurements.

Hoonestatud alade tuvastamine Sentinel-1 tehisavaradari mõõtmiste põhjal

Kalev Koppel^{1,2}, Anni Sisask², Eva-Maria Tõnson³, Kaupo Voormansik¹

1 Tartu Observatoorium, Observatooriumi 1, Tõravere, 61602 Tartumaa

2 Tartu Ülikool, geograafia osakond, Vanemuise 46, 51014 Tartu

3 Hugo Treffneri Gümnaasium, Munga 12, 51007 Tartu

Kokkuvõte

Tartu Observatooriumi radarkaugseire töörühma üheks oluliseks uurimissuunaks on hoonete tuvastamise metoodika arendamine. Piltlikult öeldes on meie unistuseks luua globaalse ulatusega ehitisregister, mis uueneb reaajas vastavalt satelliidipiltide laekumisele. Käesolev artikkel annab ülevaate töörühma viimastel aastatel tehtud uurimistöödest.

Võtmesõnad: radarkaugseire, Sentinel-1, linnastumine, hoonete tuvastamine

Sissejuhatus

Pole kahtlust, et eelolevad kümnendid toovad kaasa põhjalikke muutusi maailma rahvastiku arvus ja ruumilises paiknemises. Jättes kõrvale suhteliselt lokaalse mõjuga Euroopa rändekriisi, prognoosib ÜRO maailma linnarahvastiku arvu kahekordistumist aastaks 2050. Kui 2011. aastal elas linnades 3,6 miljardit inimest (54%), siis 2050. aastal elab neis koguni 7,4 miljardit inimest (United Nations, 2014).

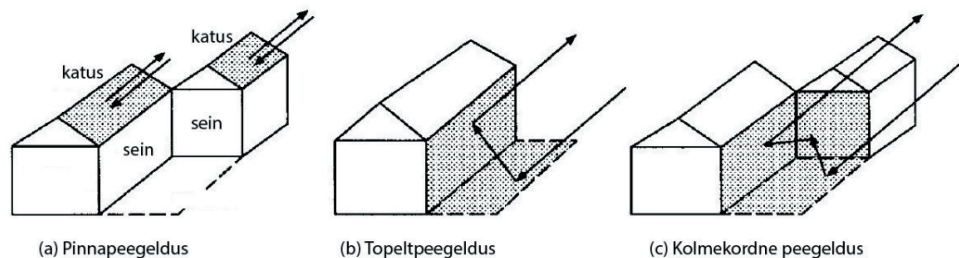
Eriti kiiresti toimub linnastumine arengumaades. Linnade kiire kasvuga kaasnevad tõsised keskkonna- ja majandusprobleemid. Linnade jätkusuutlikuma arengu tagamiseks, tõhusama planeerimispoliitika loomiseks ja ressursside mõistlikumaks kasutamiseks on tähtis omada täpset ja värsket infot linnastumise hetkeolukorra ja trendide kohta.

Radarkaugseire sobib hästi hoonestatud alade globaalseks kaardistamiseks, sest võimaldab kiirelt uuendada andmeid maailma eri piirkondadest ning tagab andmete võrreldavuse. Erinevalt optilistest seiresüsteemidest ei sõltu mikrolainepiirkonnas töötavad tehisavaradarid pilvkattest ega päikesevalgusest. Radaripiltidest moodustuvad tihedad ilmast mõjutamata aegread.

2014. aasta kevadel saadeti orbiidile Euroopa Kosmoseagentuuri Copernicuse programmi esimene radarseiresatelliit Sentinel-1A ja 2016. a aprillis tema kaksikõde Sentinel-1B. Tegu on väga hea ruumilise lahutuse ja vaateala suhtega (vastavalt 20 m ja 250 km) satelliidisüsteemiga. Ülemaailmselt võimaldab Sentineli satelliiditandem andmeid saada vähemalt iga 6 päeva järel, Eesti laiuskraadil keskmiselt iga 3 päeva järel. Copernicuse programmi tasuta ja avatud andmete jagamise poliitika annab väga hea võimaluse kasutada neid satelliidipilte linnade kasvamise mõõtmiseks (European Space Agency). Tartu Observatooriumi radarkaugseire töörühma üheks oluliseks uurimissuunaks on hoonete tuvastamise metoodika täiustamine.

Hoonestatud alade tuvastamise tehisavaradari-põhised meetodid

Ehitisi on võimalik tuvastada neilt tagasihajunud kiirguse intensiivsuse erinevuste põhjal võrreldes loodusliku fooniga. Radarisignaali tagasipeegeldumine ehitistelt on reeglina tugevam, sest maapinna suhtes ligikaudselt täisnurga all asuv hoonesein toimib radarisignaali jaoks helkurina (joonis 1).



Joonis 1. Hoonestusele iseloomulikud tagasihajumise mehhanismid. Joonis on modifitseeritud Dong jt (1997) järgi.

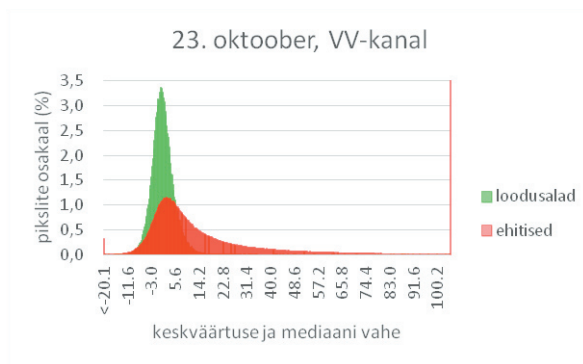
Ehitiste tuvastamiseks võib kasutada ka inimtekkeliste objektide ja loodusalade tagasihajumise lokaalse statistika erinevust. Sellele asjaolule tuginevaks meetodiks on näiteks haavelmüra divergents ehk haavelmüra hälve (Esch jt, 2010), mis kasutab ära inimtekkelistelt objektidelt tagasipeegelduva signaali väärtuste jaotuse erinevust võrreldes loodusliku fooniga. Keskvaartuse ja standardhälbe suhe on loodusalade puhul konstantne, kuid hoonestatud aladel on see seos rikutud.

Hooneid saab tuvastada ka interferomeetrilise koherentsuse määramise kaudu. Kõrge interferomeetriline koherentsus on iseloomulik tagasipeegeldajatele, mis ajas ei muutu – sh ehitised. Seevastu madal koherentsus on omane taimkattega loodusaladele, mis ajas näiteks tuule või kasvamise mõjul oma kuju ja struktuuri muudavad. Strozzi ja Wegmüller kasutasid hoonestatud alade tuvastamiseks pika ajalise vahega ERSi radaripiltide interferomeetrilist koherentsust. Uurimusest selgus, et meetod tuvastas hästi hoonestatud alasid, mille ümbruskond hõlmas vähesel määral rohelist alasid (aiad, pargid), kuid jättis tuvastamata märkimisväärse osa aedlinnadest (Strozzi, Wegmüller, 1998).

Tartu Observatooriumi teadur Kaupo Voormansik pakkus välja lihtsama lokaalsete statistikute meetodi, mis põhineb hoonestatud alade naaberpikslite amplituudi järsematel üleminekutel võrreldes loodusalade pikslitega. Hoonestatud alad leitakse 5x5 piksli suuruses libisevas aknas keskvaartuse (*mean*) ja mediaani (*median*) vahe kõrgema väärtuse põhjal (MM-meetod). Alljärgnevalt lähemalt selle meetodi rakendamisest Eesti ala testandmetega.

Anni Sisas (2015) uuris MM-meetodi sobivust Tallinna ja selle lähiümbruse andmetega. Andmetöötluseks kasutati Sentinel-1A kuiva ilma ülesvõtteid *Interferometric Wide Swath (IW)*, *Ground Range Detected (GRD)* *High resolution (H)* formaadis, kus algne ruumiline lahutus 5x20 m on üldistatud ning lahutusvõime on seega 20x22 m. Andmed on ülediskreeditud – piksli suuruseks on 10x10 m.

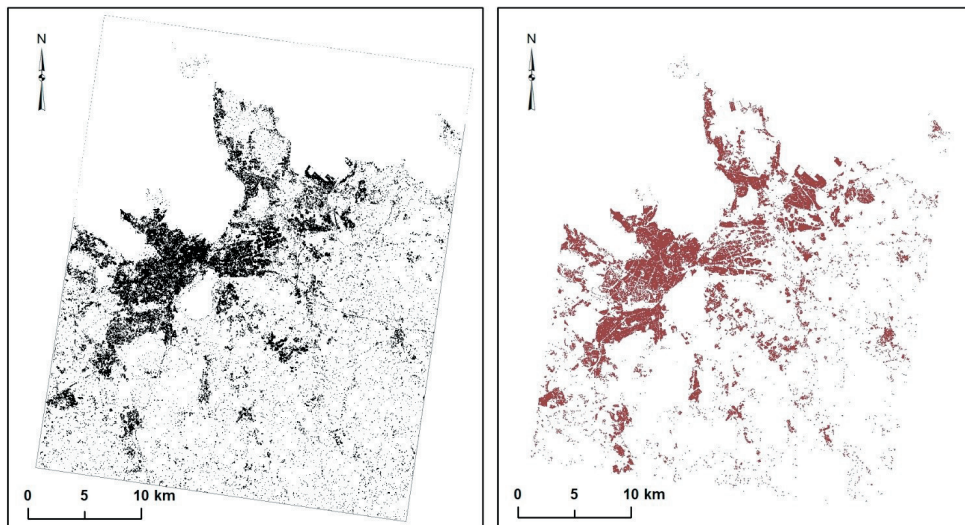
Andmetöötlus viidi läbi eraldi VV- ja VH-kanalis ning eraldi tõusva ja laskuva orbiidi ülesvõtete puhul, mis kõik hiljem kombineeriti usaldusväärse klassifitseerimistulemuse saamiseks. Mediaani ja keskvärtuse arvutamiseks kasutati keskmistavat akent suurusega 5x5 pikslit. Seejärel lahutati piksel piksli haaval keskvärtus mediaanist. Hoonete ja loodusalade referentsaladena kasutati Eesti topograafia andmekogu (ETAK) kaardikihte. Kahe maakasutusklassi eristamiseks määrati tulemikihi pikslitele piirväärtused, mille ületamisel klassifitseeriti pikslid hoonestatud alaks (joonis 2).



Joonis 2. Loodusalade ja ehitiste keskvärtuse ja mediaani vahed 23. oktoobri Sentinel-1A VV-kanali radaripildil.

Rakendati tingimuslauset, et pikslid loetakse ehitiseks, kui need asuvad väljaspool 95% loodusalade piksliväärtuste vahemikku.

Tallinna ja lähiümbruse hoonetest klassifitseeriti pärast tõusva ja laskuva orbiidi ning mõlema polarisatsioonikanali kombineerimist korrektselt 89,9% (joonis 3).



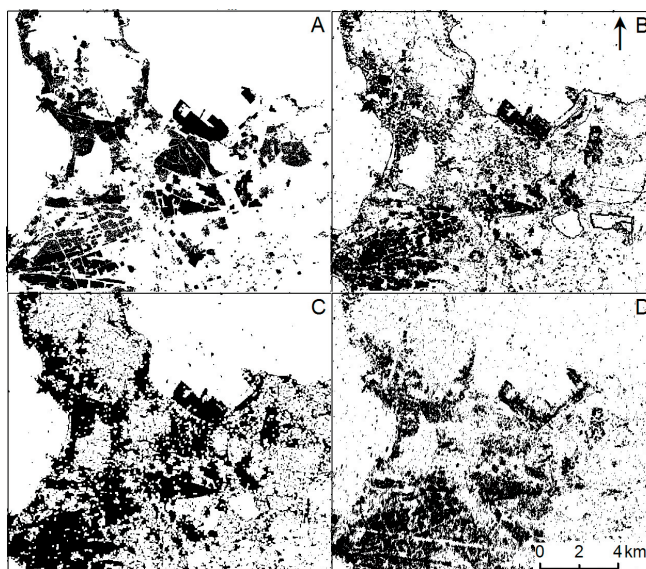
Joonis 3. Mustaga on tähistatud 95% piiri rakendamisel tuvastatud ehitised Sentinel-1 VV- ja VH-kanali kombineerimisel (vasakul) ning punasega ehitiste referentskiht (paremal).

Eva-Maria Tõnson (2016) testis meetodit lisaks Sentinel-1 andmetele ka ERS-2 ja Envisati ülesvõtetega. Uurimisalaks oli Tartu ja selle lähikülg. Sentinel-1 ülesvõtete VV- ja VH-kanali kahe orbiidi kombineerimisel klassifitseeriti korrektselt 91,2% hoonetest. Meetodit täiendati ja optimeeriti valehäirete vähendamiseks: hoonestatud alad määrati kahelt iseseisvalt töödeldud pildipaarilt ning tulemusest lahutati veekogude kiht. 2014. aastal alanud Sentinel-1 aegrida ERS-2 ja Envisati andmetega väga edukalt ajas tagasi viia ei saa, kuna hoonete klassifitseerimistäpsus on juba oluliselt madalam (ca 60%).

MM-meetodi usaldusväärsus on võrreldes teiste levinud hoonestuse tuvastuse meetoditega konkurentsivõimeline. Tallinna ja Ida-Viru testaladel andis MM-meetod samu lähteandmeid (Sentinel-1, IW GHRD) kasutades haavelmüra häälbega võrreldava klassifitseerimistäpsuse (tabel 1, joonis 4). SLC ülevõtetel põhinev interferomeetiline koherentsus oli hoonete tuvastamiseks mõnevõrra ebatäpsem (Koppel jt 2015).

Tabel 1. Hoonestatud alade tuvastamistäpsus haavelmüra häälbega (SD), keskvaartuse ja mediaani vahe (MM) ja interferomeetrilise koherentsuse (COH) puhul. Eraldi tulbad tõusva (ASC) ja laskuva (DESC) orbiidi jaoks ning mõlema orbiidi ja polarisatsioonikanali kombinatsioonis.

		ASC VV+VH	DESC VV+VH	Kõik kombineeritud
Tallinn	SD	89/48	89/49	88/68
	MM	90/50	91/43	89/72
	COH	85/56	83/46	81/53
Ida-Viru	SD	91/36	91/39	89/57
	MM	92/32	92/34	91/54
	COH	78/38	82/35	70/56

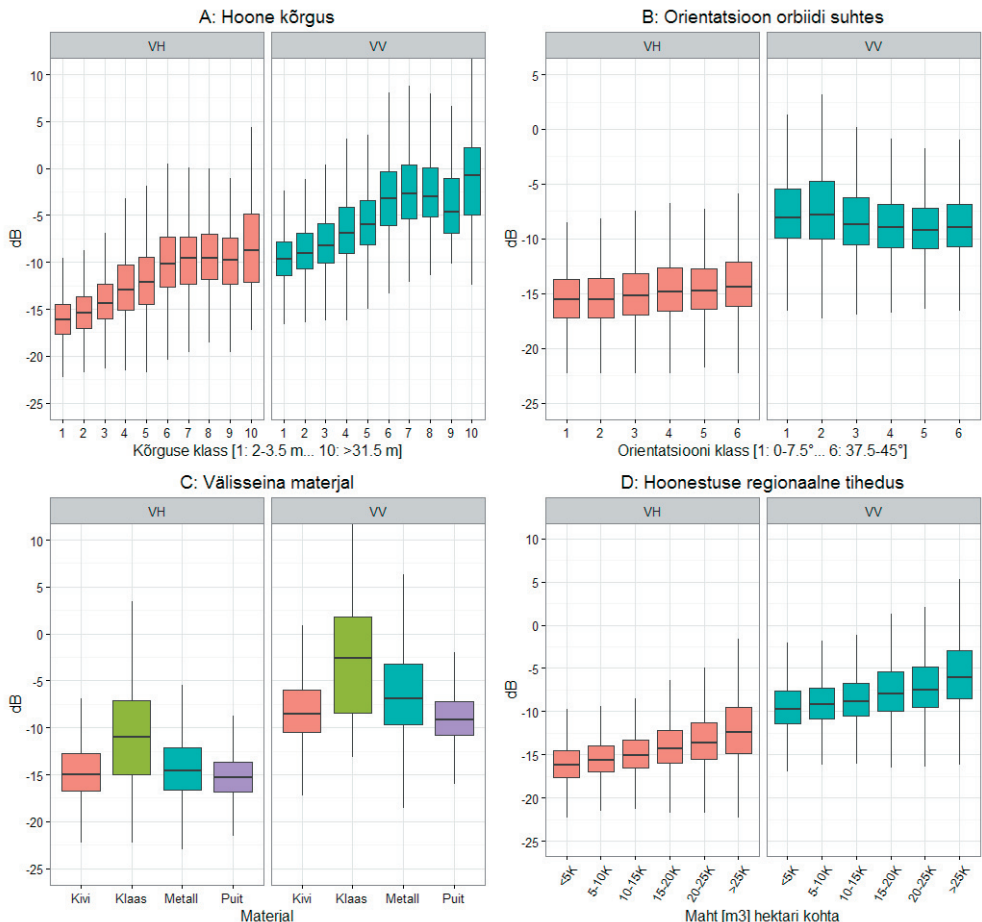


Joonis 4. Eri meetodeid kasutades saadud hoonestusala tulempildid. Väljavõtte Tallinna uurimisalast: ETAKi referentsandmed (A), haavelmüra häälbega (B), keskvaartuse ja mediaani vahe (C) ja interferomeetiline koherentsus (D). Tulemused on saadud mõlema orbiidi ja polarisatsioonikanali kombineerimisel.

Hoonete füüsiliste parameetrite mõju tehisavaradari tagasihajumisväärtustele

Hoonete suurus, välisseinte ja katuse materjal, orientatsioon radari vaatesihi suhtes, hoonekarbi kuju, hoonestuse tihedus ja teised tunnused mõjutavad radarini tagasihajunud kiirguse intensiivsust ja iseloomu. Nende tunnuste Sentinel-1 andmetele avaldunud mõju kvantifitseerimine ja optimeerimine on hoonete tuvastamise meetodika edasise täiustamise seisukohalt kriitilise tähtsusega. Esitame siinkohal esialgsed tulemused.

Hoonete andmebaasina kasutatakse Tallinna ruumiandmete registrit (TAR), mis sisaldab 9.12.2015 seisuga andmeid 51 599 hoone kohta. Andmebaasis on hoonete kontuurid mõõtkavas 1:2000 ja paljude teiste atribuutide seas ka andmed hoone



Joonis 5. VV- ja VH-kanali tagasihajumisväärtuste jaotus hoone kõrgusklasside (A), orientatsiooniklasside (B), materjali (C) ja hoonestuse tiheduse klasside (D) kaupa. Karpdiagrammil näitab horisontaalne keskmine joon mediaani, mille ümber on kast, mis näitab alumist ja ülemist kvartiili, ning nn vuntsid, mille ulatus näitab 1,5-kordset kvartiilivahemikku.

välisseina peamise materjali kohta. Järjepidevad andmed hoonete katusematerjali ja kõrguse kohta puuduvad. Hoonete keskmised kõrgused on tuletatud Maa-ameti maakatte kõrgusmudelist (nDSM) piksli suurusega 1 m (Maa-amet, 2015). Lisaks välisseinte materjalile ja keskmisele kõrgusele arvutati igale hoonele GIS-tarkvaras tema orientatsiooni nurk radari vaatesuuna suhtes, hoone maht [m^3], regionaalne hoonestuse tihedus (hoonete maht [m^3] hektari kohta). Andmebaasi arvutati iga hoone kohta Sentinel-1 tõusva ja laskuva orbiidi VH- ja VV-kanali keskmine amplituudväärtus, mis teisendati hiljem tulemuste selgemaks esitamiseks dB-skaalasse.

Tulemused on esitatud karpdiagrammidena (joonis 5) ja radari tagasihajumisväärtuse ja muutuja korrelatsioonikordajana.

Hoone kõrguse mõju tagasihajumisväärtustele on kõige tugevam (Pearsoni R-koefitsient VH-kanalis 0,41, VV-kanalis 0,33). Samasuunaline on ka hoonestuse tiheduse mõju. Hoonete keskmine kõrgus ja hoonestuse tihedus ongi omavahel tugevas seoses. Hoone orientatsiooni mõju paistab välja oodatust nõrgemini. Korrelatsioon on VV- (0,15) ja VH-kanalis (-0,14) erisuunaline. Seos võib olla ka analüüsi iseärasuste tõttu alahinnatud: erineva orientatsiooniga objektide väärtuste segunemine pikslis. Materjalidest annavad kõige tugevama tagasihajumise metall- ja klaashooned (viimased on reeglina samuti metallkonstruktsiooniga).

Viidatud kirjandus

- Dong, Y., Forster, B. & Ticehurst, C. (1997). Radar backscatter analysis for urban environments. *International Journal of Remote Sensing*, 18(6), pp. 1351-1364.
- Eesti Maa-amet. (2015). Maa-ameti koduleht - Maa-ametil on valminud maakatte ja taimkatte kõrgusmudelid. http://www.maaamet.ee/index.php?page_id=1&lang_id=1&news_id=1123&no_cache=1465901115.
- Esch, T., Thiel, M., Schenk, A., Roth, A., Muller, A., Dech, S. (2010). Delineation of Urban Footprints From TerraSAR-X Data by Analyzing Speckle Characteristics and Intensity Information. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(2), pp. 905-916.
- European Space Agency. (2016). Sentinels Scientific Data Hub. <https://scihub.copernicus.eu/dhus> (21.01.2016).
- Koppel, K., Zalite, K., Sisas, A., Voormansik, K., Praks, J., Noorma, M. (2015). Sentinel-1 for Urban Area Monitoring — Analysing Local-area Statistics and Interferometric Coherence Methods for Buildings' Detection. *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 1175-1178.
- Sisas, A. (2015). Ehitiste tuvastamine radarsatelliidi Sentinel-1A mõõtmiste põhjal. Magistritöö. <http://dspace.ut.ee/handle/10062/48404> (31.01.2016).
- Strozzi, T., Wegmuller, U. (1998). Delimitation of Urban Areas with SAR Interferometry. *1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings (IGARSS '98)*, 3, 1632-1634.

Tõnson, E.-M. (2016). Hoonestatud alade tuvastamine ERS-2, Envisati ja Sentinel-1 tehis-
avaradarite andmetelt. Uurimistöö. 2016.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
(2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. [http://esa.un.org/unpd/wup/
Publications/Files/WUP2014-Highlights.pdf](http://esa.un.org/unpd/wup/Publications/Files/WUP2014-Highlights.pdf) (27.12.2015).

Detecting built-up areas from radar satellite Sentinel-1

Summary

The development of built-up area mapping methodology is one of the priorities for the radar remote sensing work group of Tartu Observatory. The dream and end goal is to create a global buildings registry, which is updated in accordance with newly acquired satellite images. The current article gives an overview of our work group's research from 2014 to 2016.

Rohumaade radarkaugseirest Eestis 2011–2016

Kaupo Voormansik^{1,2}, Tanel Tamm^{1,2,3}, Karlis Zalite^{1,2,4}

- 1 Tartu Observatoorium, Observatooriumi 1, Tõravere, Nõo vald, 61602 Tartumaa
- 2 OÜ KappaZeta, Mäeallika, Suure-Jaani vald, 71508 Viljandimaa
- 3 Tartu Ülikool, ökoloogia ja maateaduse instituut, Vanemuise 46, 51014 Tartu
- 4 Lundi Ülikool, füüsilise geograafia ja ökosüsteemide osakond, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Rootsi

Kokkuvõte

Artikkel annab ülevaate radarkaugseire tööühma niitmise tuvastamise alasest rakenduslikust uurimistööst AS Regios, Tartu Ülikoolis ja Tartu Observatooriumis. Alates 2011 suvest on läbi viidud neli põhjalikumalt välitööde seeriat (2011, 2013, 2015 ja 2016) ning avaldatud kolm teadusartiklit. Kirjeldatakse tehtud töid ja artiklites publitseeritud peamisi tulemusi. Tänu Sentinel-1 ja Sentinel-2 avatud ja tasuta satelliidipiltide tihedate aegridade kättesaadavaks muutumisele ning tehtud ettevalmistustele on tänaseks jõutud infosüsteemi loomiseni, mis praeguse ajakava järgi peaks tööd alustama 2018 suvel. Euroopa ühtse põllumajanduspoliitika raames on loodaval rakendusel Euroopa Liidus arvestatav majanduslik mõju. Edu korral on väga tõenäoline, et meie süsteemi hakkavad kasutama veel mitmed teised Euroopa riigid.

Võtmesõnad: tehisava-radar, radarkaugseire, rohumaade kaugseire, niitmise tuvastamine, PRIA

Sissejuhatus

2010/11 talvel pakkus Regio selleaegne juht Teet Jagomägi välja, et tuleviku satelliitseirerakenduste loomisel võiksime ühe teemana mõelda rohumaade niidetud alade kaardistamisele Põllumajanduse Registrite ja Informatsiooni Ametiga (PRIA). Regio tööstusdoktorandina jätsin ettepaneku meelde ja asusin teemat edasi arendama. Vaatamata Teet Jagomägi algatusele ta ise rakenduse loomisel ja satelliitseire teemas laiemalt kaasa ei löönud, leides, et mobiilpositsioneerimise valdkonnas on viljad lähemal ja seeläbi võimalik Eestile rohkem maksutulu teenida. Rakenduse arendamisel sai meie tekkiva radarkaugseire tööühma panuse kõrval määravaks hoopis PRIA roll, kes tugeva kasutajana uurimistööd suunas ja oma vajadusi tutvustas.

Lahendamist vajava ülesande sisuks on kontrollida, kas ja millal uuritavaid rohumaid niideti. Informatsioon on vajalik eelkõige Euroopa Liidus (EL) makstavate põllumajandustoetuste järelevalve seisukohast, sest rohumaade niitmine on üheks toetuse maksmise nõudeks. Tähtis on ka avalikkuse teavitamise aspekt, niitmise seisu avalikul veebikaardil kuvades on lihtne näha, mille eest täpselt Euroopa Liidu põllumajandustoetusi makstakse. On oluline märkida, et EL-i ühtse põllumajanduspoliitika tõttu pole rakendus tähtis ainult

Eestis, vaid teisteski EL-i riikides, kus rohumaadel on pindalas suur osakaal. Peale riiklike kasutajate võib niitmise tuvastamine huvi pakkuda ka põllumajanduse suurettevõtetele, kes soovivad oma alltöövõtjate tehtus veenduda ja oma valdustel silma peal hoida.

Ideest teostusele lähemale liikumiseks kohtusid 2011 mais Regio Tartu kontoris Ahti Bleive, Kai Raudvere PRIAst ning allakirjutanu. Valisime välja esimesed proovialad Matsalus ja Tartu lähedal Ihaste luhal ning uurimistöö tarbeks välitööde andmete kogumine sai alguse. Proovialade kohta tellisime ära ka esimesed TerraSAR-X radaripildid Saksa Kosmosekeskusest, kes andis oma kõrgkvaliteetseid andmeid uurimistöö otstarbeks väga soodsa hinnaga.

Tänapäevaks on radarkaugseirel põhineva rohumaade niitmise tuvastamise probleemiatk käsitletud kahes Tartu Ülikoolis kaitstud doktoritöös, avaldatud on kolm teadusartiklit eelretsenseeritavates ajakirjades ning 2016 sügisel lisandub arvatavasti veel neljas. Järgnevas anname ülevaate läbiviidud välitöödest, avaldatud teadusartiklite peamistest tulemustest ning uurimis- ja arendustööst 2016 suvelõpu seisuga.

Läbiviidud välitööd

Kokku on välitöid tehtud neljal suvel (2011, 2013, 2015 ja 2016) ja kolmel erineval proovialal (Matsalu, Ihaste ja Rannu). Välitööd on arenenud aja jooksul keerukamaks ning seejärel tagasi veidi lihtsamaks, et keskenduda radari jaoks kõige olulisemate taimkatte ja mulla parameetrite fikseerimisele ning välitööde aega otstarbekalt kasutada. Lisaks erinevate rohumaade jälgimisele vaadeldi 2015 suvel ka rapsi-, nisu- ja maisipõlde TanDEM-X-iga rohu- ja põllukultuuride kõrguse mõõtmise eksperimendi raames. Keskkel kohal on olnud satelliidiütlelendudega ajastatud rohumaade parameetrite aegriidide loomine, olemaks kindel, et välitöödel mõõdetud olukord vastab võimalikult täpselt sellele, mida satelliit ülevalt näeb. Tihedad aegriidid on tähtsad fenoloogiliste protsesside eristamiseks ilmast tingitud keskkonnamuutustest (nt taimede määrgumine vihmaajast, lamandumine tuule mõjul) ja põldude majandamise tegevustest (nt niitmine, kündmine, külv).

Esimesed välitööd tehti 2011 suvel Matsalus ja Ihastes. Mõlema ala kohta oli tellitud seitse 1–3 m lahutusega TerraSAR-X pilti 11- kuni 22-päevase ajalise sammuga. Välitöid tehti iga kord satelliidipildi tegemisega samal päeval, aga mitte tingimata samal kellaajal. Mõõdeti rohu kõrgust põllu keskel, märgiti üles niitmise seis (niidetud või niitmata) ning kvalitatiivne niiskuse ja rohu tiheduse hinnang, igast vaatluse all olnud põllust tehti igal välitöö päeval pildid põhja, itta, lõunasse ja läände. Kuigi välitöid tehti nii Ihaste kui ka Matsalu proovialal, läksid lõpuks uurimistöös kasutusse ainult Matsalu andmed, sest Ihaste kohta tellitud ühe polarisatsiooniga piltide andmestik osutus niitmise tuvastamiseks liiga vaeseks – arvatud HH polarimeetrilise kanali tagasihajumise muutusi oli väga keeruline usaldusväärselt rohumaad muutustega siduda.

Värskest eelmise eksperimendi andmete analüüsist õppinuna ning teadusartikli avaldamise järel kavandasime 2012/13 talvel märgatavalt põhjalikuma eksperimendi nii satelliidi kui ka välitööde andmete poolest. Otsisime kohta Tartule Matsalust märgatavalt lähemal, et tihe põllul käimine ajaliselt ja rahaliselt võimalik oleks.

PRIA väljapakutud variantidest jäime lõpuks pidama Rannu prooviala juurde, sest see oli meie rühma uuele baasile Tõraveres väga lähedal, Rannus oli väiksel alal koos piisavalt erinevaid rohu- ja põllumaid ning – mis kõige olulisem – arendustööst huvitatud, avatud ja sõbralikke talunikke. Välitöid tehti ning satelliidid pildistasid Rannu prooviala mai algusest oktoobri alguseni kokku 47 korral. Kasutasime RADARSAT-2 täispolarimeetrilisi ja TanDEM-X kaksikpolarimeetrilisi andmeid ning COSMO SkyMEDi 1-päevase ajalise vahega võetud

interferomeetrilisi pildipaare. Keskmiselt toimusid välitööd 2013 suvel igal kolmandal päeval, vahel oli suisa kaks satelliidi ülelendu ja välitöödel andmete kogumist ühel päeval, nii hommikul kui ka õhtul. Olulise täiustusena tegime sel suvel välitööd satelliidi ülelennuga võimalikult samal kellaajal, et nt muutlikele niiskuseludele satelliitmõõtmisega üheaegselt pihta saada. Kui satelliit pildistas Rannu testala 6:57 hommikul, siis välitöid tehti põldudel 6:00 ja 8:00 vahel. Võrreldes 2011 suviste välitöödega mõõtsime sel korral ka mullaniiskust, märga ja kuiva biomassi. Märja ja kuiva biomassi mõõtmiseks kasutasime puust valmistatud 0,5 m × 0,5 m ühikruutu, millega fikseeritud alalt lõikasime võimalikult maapinnalähedalt kogurohu, kaalusimeselle kohe märjalt põllul, võtsime proovi kaasa, kuivatasime ning kaalusime seejärel uuesti kuivalt.

Viimaste aastate välitööd 2015 ja 2016 suvel erinesid üksteisest väga vähe. Erinevuseks oli vaid kuiva biomassi mõõtmisest loobumine 2016 suvel, sest praktiline kasu neist mõõtmistest oli suhteliselt väike ja samal ajal oli nende andmete saamine väga ajakulukas. Radarile loeb eelkõige märg biomass. Vee kõrge dielektrilise läbitavuse tõttu on radarikiirgus vastastikmõjus eelkõige vett sisaldavate taimedega, kuiv taim on radarile peaaegu nähtamatu. Nii 2015 kui ka 2016 välitööd viidi läbi tuttavalt Rannu proovialal, lähtudes 2013. aasta metoodikast. Peamiseks täienduseks oli punktmõõtmistelt (proovid võetakse ühest kohast põllu keskel) läbilõikemeetodile üleminek. Mõõtmised tehti subjektiivsuse elimineerimiseks ning ruumilise heterogeensuse arvesse võtmiseks põllu läbilõikena 250 m sirgel joonel iga 25 m järel. Peale rohumaa andmete koguti 2015 suvel põhjalikud aegread ka nisu, rapsi ja maisi taimede parameetrite muutustest võrdluseks bistaatiliste pika baasiga TanDEM-X interferomeetriliste andmetega, et arendada põllukultuuride kõrguse hindamise metoodikat. Tänapäeval on TanDEM-X põllukultuuride kõrguse hindamise andmed veel lõpuni läbi uurimata, oodates uurimisprojektide rahastust ja asjast huvitatud tudengeid.



Joonis 1. Tartu Observatooriumi välisülikooli praktikant Kim Ngan Duong Vietnamist ja Tartu Ülikooli teadur Tanel Tamm välitöödel OÜ Rannu Seeme talinisupõllul juunis 2015.

Avaldatud teadusartiklid

Lisaks mitmetele retsenseeritud ja retsenseerimata konverentsiettekannetele Eestis ja mujal on meie rühm seni avaldanud kolm eelretsenseeritud teadusartiklit rohumaaade niitmise radarkaugseirega tuvastamise metoodika arendamisest.

Towards a detection of grassland cutting practices with dual polarimetric TerraSAR-X data, 2013 [1]

Artikkel põhineb 2011 suve Matsalu välitööde andmetel ja 22-päevase intervalliga kogutud TerraSAR-X HH/VV polarimeetriliste radarsatelliidipiltide aegreal. Andmetöötlus ja analüüs viidi läbi peamiselt 2011/12 talvel Saksa Kosmosekeskuses Kaupo Voormansiku sealse praktika ajal. TerraSAR-X lähteandmete kolmest lineaarselt sõltumatust parameetrist (HH- ja VV-kanali amplituud ning nende suhteline faasivahe) tuletati kõik enamlevinud polarimeetrilised näitajad (sh Cloude-Pottier' soovitatud entroopia-alfa dekompositsiooni parameetrid), mille ajalist käiku võrreldi sündmustega rohumaaadel. Peamise tulemusena leiti, et antud lähteandmetega on võimalik tuvastada niidetud alasid, kui rohi jäetakse maha lebama. Nimetatud seisule viitasid mitmed polarimeetrilised näitajad – kõige selgemini dominantse alfa parameetri iseloomulik tõus üle 25°, mis niitmata rohumaa või niidetud ja koristatud rohumaa korral oli reeglina alla 10°. Seevastu koristatud rohu korral oli kõrge ja madala rohu eristamine TerraSAR-X HH/VV polarimeetriliste lähteandmetega peaaegu võimatu. Täheldati ka HH/VV polarimeetrilise koherentsuse kergest langust (umbes 0,1 ühikut ehk 10%) pärast niitmist, kuid suuremat tähelepanu sellele leiule siis pöörata ei osatud.

Observations of Cutting Practices in Agricultural Grasslands Using Polarimetric SAR, 2016 [2]

Artikkel põhineb 2013 suve Rannu välitööde andmetel, 11-päevase intervalliga kogutud TerraSAR-X HH/VV kaksikpolarimeetriliste ja 24-päevase intervalliga kogutud RADARSAT-2 täispolarimeetriliste radarsatelliidipiltide aegreal. Andmetöötlus ja analüüs viidi läbi peamiselt 2014 kevadel Saksa Kosmosekeskuses Kaupo Voormansiku uurimisvisiidi ajal. Andmetöötlus oli suures plaanis samasugune nagu eelmise artikli korral, kuid TerraSAR-X aegrida oli poole tihedam, välitööd oluliselt põhjalikumad ning võrdluseks olid ka täispolarimeetrilised RADARSAT-2 andmed (5 lineaarselt sõltumatut parameetrit iga piksli kohta – HH-, VV- ja VH-kanali amplituud ning nende kanalite vahelised suhtelised faasivahed). Peamise leiuna avastati, et niitmisele viitab kõige selgemalt TerraSAR-X HH/VV polarimeetrilise koherentsuse langus (keskmiselt 12%) ja entroopia kasv (keskmiselt 7%) ning vastavate parameetrite muutus on seda tugevam, mida rohkem rohtu jääb niitmisele maha. Täheldatud efekt läks kokku radarisignaali tagasihajumise modelleerimisega: kasvav rohi, peamiselt vertikaalselt orienteeritud dipoolid – kõrge HH/VV polarimeetriline koherentsus vs. niidetud rohi, juhuslikumalt orienteeritud dipoolid – madal HH/VV polarimeetriline koherentsus. Suure põnevusega oodatud RADARSAT-2 täispolarimeetrilised andmed valmistasid teatava pettumuse.

Sarnaselt TerraSAR-X andmetele ilmnes niitmise järel reeglina HH/VV polariimeetrilise koherentsuse langus ja entroopia kasv, kuid muutus aegreas oli oluliselt väiksem. Tõenäoliselt põhjuseks pakuti välja RADARSAT-2 hõredam aegrida (24- vs. 11-päevane sagedus). Leiti ka, et uuritavad Rannu kultuurrohumaad näisid vaatesuuna suhtes ringsümmeetrilised. Sarnase langemisenurga korral polnud hommikuse (vaade idast) ja õhtuse (vaade läänest) ülelennu polarimeetristes parameetrites peaaegu mingisugust vahet. Näib, et tõusva ja laskuva orbiidi polarimeetrilise radari andmeid võib kasutada rohumaadel sarnase langemisenurga korral läbisegi.

Monitoring of Agricultural Grasslands With Time Series of X-Band Repeat-Pass Interferometric SAR, 2016 [3]

Seegi artikkel põhineb 2013 suve Rannu välitööde andmetel, kuid polarimeetriliste radaripiltide aegridade asemel kasutati siin COSMO SkyMEDI ühepäevase ajavahega kogutud interferomeetrilisi pildipaare. Andmetöötluse ja analüüsi viis läbi Karlis Zalite 2014–2015. Peamise tulemusena leiti rohu kõrguse ja interferomeetrilise koherentsuse vahel tugev negatiivne eksponentsiaalne seos ($r^2=0,81$), mis viitab antud parameetri kasutamispotentsiaalile niitmise tuvastamise infosüsteemides tulevikus. Interferomeetrilise koherentsuse kasutamise korral tuleb aga arvestada vihma ja kündmise mõjuga. Nii tugev vihm kui ka kündmine interferomeetrilise pildipaari tegemise vahel viib märkimisväärse koherentsuse languseni. Madala rohu korral märgiti ka tugevat lineaarset seost mullaniiskuse ja COSMO SkyMEDI mõõdetud X-laineala HH-kanali tagasihajumise vahel.

Niitmise tuvastamise infosüsteemi arendamine PRIAle

Copernicuse programmi käivitumine ja eriti just Sentinel-1 ja Sentinel-2 satelliitsüsteemide orbiidile jõudmine on muutmas võimalikuks operatiivse niitmise tuvastamise infosüsteemi ehitamise. Esimest korda satelliitseire ajaloos on kättesaadavad tihedad (mitu korda nädalas) kõrglahutusega (10–20 m) optiliste ja radarsatelliidipiltide aegread.

Kasutades ära viimase 5 aasta uurimistööd ja saadud kogemusi, on Tartu Observatoorium koostöös CGIga arendamas Sentinel-1 ja Sentinel-2 aegridade põhist niitmise tuvastamise infosüsteemi PRIAle. Arendustöö algas 2016 suvel ning 2018 kevadeks on plaanis jõuda süsteemi operatiivkasutuseni kogu Eesti ulatuses, viies eelnevalt läbi põhjalikud testid 2017 vegetatsiooniperioodil. Analüüsi täpsustamiseks kasutatakse lisaks Sentinel-1 radariandmetele ja Sentinel-2 optilistele mõõtmistele ka meteoroloogilisi andmeid. Eduka kasutuselevõtu järel Eestis on tõenäoline lahenduse eksport teistesse Euroopa Liidu riikidesse. Seni on oma huvi kõige selgemalt väljendanud põllumajandustoetuste makseagentuurid Taanis ja Leedus, kus on Eestist oluliselt suurem põllumaa osakaal. Vastavalt on seal niitmise nõude kontrollil ka miljonitesse eurodesse ulatuv majanduslik mõju.

Vaade tulevikku

Andmeallikate rohkuse (nt Copernicuse programmi Sentineli satelliitide seeria ja Planet Labsi kõrglahutusega väikesatelliitide parv) ja infotehnoloogia vahendite arengu toel on satelliitseire jõudmas väga huvitavasse ajajärku. Pika ajalooga uurimistöö järel on muutumas võimalikuks mitmed seni paberil püsinud infosüsteemid. Interneti kaudu kättesaadavaks tehtud faktiinfo kõrvale hakkab jõudma üha enam avatud reaalajalisi infosüsteeme. Satelliitide ja sensorvõrgustike abil on võimalik jälgida ilma ja keskkonnatingimuste muutusi, Eesti elektritarbimist, põlevkivijaamade ja tuuleparkide toodangut. Käesolev arendus on üheks ehituskiviks sellel teel avatud saladusteta maailma poole.

Tänuavaldused

Rakenduslik rohumaade kaugseire uurimistöö on osutunud edukaks vaid tänu väga paljude heade inimeste toetusele. Märkimisväärse panuse meie uurimis- ja arendustöö eduks on andnud Kai Raudvere, Ahti Bleive ja Roman Belov PRIAst, Madis Ajaots OÜst Rannu Seeme ja Rait Hallimäe OÜst Rannu Mõis. Saksa Kosmosekeskus, Euroopa Kosmoseagentuur ning ettevõtted MDA ja E-Geos on andnud oma satelliitide andmeid uurimistööks väga soodsatel tingimustel. Meteoroloogiliste parandite leidmisel on ilmaandmete ja juhendamiseiga toetanud Aarne Männik, Tanel Voormansik, Aleksei Vaštšenko ja Velle Toll Keskkonnaagentuurist. Märja ja kuiva biomassi määramisel on oma oskusteabe ja tööga aidanud Mart Hovi ja Liina Talgre Eesti Maaülikoolist. Tüütutel, ent vajalikel varaste hommikutundide välitöödel on paljude teiste kõrval enim panustanud Kaarel Kaisel, Kirke Narusk, Mihkel Järveoja, Tarvi Verro, Kristjan Erusk ja Mirjam Randla. Välitööde aparatuuri laenamise ja igakülgse juhendamiseiga on aidanud Jaan Praks Aalto Ülikoolist ning Krista Takkis Tartu Ülikoolist. Algusaastatel, kui meie uurimistöö katteks polnud veel ühtegi spetsiaalselt rohumaade kaugseireks mõeldud projekti, oli töö käivitamisel määravaks Anu Reinarti organiseeritud Tartu Observatooriumi rahaline ja infrastruktuuriline toetus.

Viidatud kirjandus

- [1] Voormansik, K., Jagdhuber, T., Olesk, A., Hajnsek, I. and Papahtanassiou, K. P. (2013). Towards a detection of grassland cutting practices with dual polarimetric TerraSAR-X data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 34, no. 22, pp. 8081-8103, 2013.
- [2] Voormansik, K., Jagdhuber, T., Zalite, K., Noorma, M. and Hajnsek, I. (2016). Observations of Cutting Practices in Agricultural Grasslands Using Polarimetric SAR. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 9, no. 4, pp. 1382-1396, 2016.
- [3] Zalite, K., Antropov, O., Praks, J., Voormansik, K. and Noorma, M. (2016). Monitoring of Agricultural Grasslands With Time Series of X-Band Repeat-Pass Interferometric SAR. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 9, no. 8, pp. 3687-3697, 2016.

Radar remote sensing of Estonian grasslands

Summary

The article gives an overview about radar remote sensing group's applied research on mowing detection methodology development in AS Regio, University of Tartu and Tartu Observatory from 2011 to 2016. Since the beginning in summer 2011 four field survey campaigns (2011, 2013, 2015 and 2016) have been carried out and three peer-reviewed articles have been published. Thanks to the preparatory work and free and open time series of Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite data, an operational mowing detection infosystem is currently in development for the Estonian Agricultural and Information Board. The mowing detection infosystem is planned to go into operational mode in 2018. The infosystem has remarkable economic impact in the context of European Union's Common Agricultural Policy. In case of success our infosystem will in all likelihood be used also in other European countries.

UAV-ga kogutud andmete põhjal loodud ortofoto ja reljeefimudeli täpsus

Edgar Sepp, Tõnu Oja, Marko Kohv

Tartu Ülikool, ökoloogia ja maateaduse instituut, Vanemuise 46, 51014 Tartu

Kokkuvõte

Artikkel keskendub UAV fotogramm-meetria teel saadud ortofoto ja pinna-mudeli horisontaalse ja vertikaalse täpsuse hindamisele. Ühest lähteandmestikust tehakse erineva arvu ja paigutusega maapealseid kontrollpunkte valides kokku 17 erinevat 3D-mudelit, mille põhjal salvestatakse ortofotod ja pinnamudelid. Kõik kontrollpunktid on mõõdistatud RTK GPS-iga ja mudeli loomisel mittekasutatud kontrollpunktide abil leitakse igale mudelile veahinnangud. Horisontaalse vea (RSS XY) arvutamiseks kasutatakse loodud ortofotosid, kõrvutades neid mõõdistus-andmetega, ja vertikaalse vea (RMS Z) saamiseks kasutatakse pinnamudeli ja mõõdistusandmete erinevusi.

Võtmesõnad: UAV, fotogramm-meetria, horisontaalne ja vertikaalne veahinnang

Sissejuhatus

Lühend UAV tuleneb ingliskeelsest terminist *Unmanned Aerial Vehicle* ja tähistab mehitamata õhusõidukit (MÕS). Paralleelselt UAV-ga liigub veel sisuliselt sama tähendusega termineid, näiteks UAS (*Unmanned Aerial System*), RPAS (*Remotely Piloted Aerial Systems*) ja droon, mis on ehk rahva seas enim levinud nimetus.

UAV-d on muutunud järjest odavamaks ja kättesaadavamaks ning nende kasutus on aina laienenud. Muude valdkondade seas on üha populaarsem rakendada droone eri sorti kaardistamist ja dokumenteerimist vajavates valdkondades, nagu näiteks arheoloogia ja geomorfoloogia, kus soovitakse saada uuritavast objektist väga detailne ülevaade 3D-mudelina. Droonide kasutamise suure plussina tuuakse välja meetodika oluliselt suurem kiirus, odavam hind ning samaväärne täpsus, võrreldes tahhümeetriga mõõdistamise või laserskaneerimisega (Westoby jt 2012; Hugenholtz jt 2013; Chiabrando jt 2011). UAV-d leiavad kasutust ka mitmesuguste muutuste seirel, uued arenevad valdkonnad on täppispõllumajandus (Candiago jt 2015, Luna ja Lobo 2016), infrastruktuuri ülevaatus (elektriliinid, tuuleturbiinid, päikesepaneelid, teed) (<http://>). Järjest enam areneb UAV-de kasutus ka kaardistamise (Uysal jt 2015; Lehmann jt 2016) ning erinevate sensorite rakendamise suunas (termokaamerad, multispektraalsed ja hüperspektraalsed sensorid, lidar) (Salami jt 2014, Wallace jt 2012).

Mehitatud ja mehitamata õhusõidukitelt on fotosid juba varemgi tehtud, alustades kasvõi 19. sajandi teisel poolel tegutsenud Nadarist, kes õhupallil lennates pilte tegi. Fotogramm-meetria on samuti päris pikkade traditsioonidega valdkond. Praegune

UAV-de külge kinnitatud fotoaparaatidega kaardistamine erineb aga mõneti klassikalisest fotogramm-meetriast. Seetõttu kasutame ka selles töös Eisenbeißi doktoritöö (2009) järgi täpsustatud mõistet UAV fotogramm-meetria. Viimati nimetatut on saanud võimalikuks tänu arvutite kasvanud võimsusele ja arvutigraafika ning pilditöötluse algoritmide arengule, mis võimaldab korraga läbi töötada suure hulga fotosid, tuvastada nendelt iseloomulikud punktid, mille abil fotod omavahel seotakse, et seejärel erinevate algoritmide ja matemaatiliste lähennemiste abil luua fotografeeritud objektist 3D-mudel. Kogu protsess on seejuures suuremas osas automatiseeritud.

Snaveily (2008) oli esimene, kes fotode abil objekti 3D-mudeli loomise probleemi nii suurelt ette võttis. Oma doktoritöös töötas ta välja algoritmid ja programmi (Bundler, <http://www.bundler.org>), mis võimaldasid tal internetist allalaaditud fotode põhjal luua objektist 3D-mudeli. Suureks väljakutseks oli seejuures eri kaamerate ja eri vaatenurkadest tehtud fotode kokkupanek. Siit ainult samm edasi oli kasutada neid algoritme UAV-ga tehtud pildidel. 2009. aastal kaitsnud Eisenbeißi doktoritöösse (*UAV Photogrammetry*) need algoritmid veel ei jõudnud, aga näiteks 2010. aastal on need kasutusel juba Dandois' ja Ellise (2010) artiklis.

Käesoleva artikli eesmärk on uurida UAV fotogramm-meetria teel saadud ortofoto ja reljeefimudeli täpsust. Eraldi vaadeldakse horisontaalset ja vertikaalset täpsust. Kokku valmistati ühe andmestiku baasil 17 erinevat 3D-mudelit (kasutatud erineva hulga ja paigutusega maa peal mõõdistatud kontrollpunkte), mille baasil valmistati ortofotod ja reljeefimudelid. Ortofotode põhjal hinnatud horisontaalne täpsus kõikus vahemikus 10,3–16,9 cm (*Root Sum Square* – RSS XY) ja vertikaalne täpsus, mida hinnati pinnamudeli ja mõõdistatud punktide võrdlemisel, kõikus vahemikus 11,6–38,6 cm (RMS Z).

UAV fotogramm-meetria

UAV fotogramm-meetria erineb Snaveily (2008) sõnul klassikalisest fotogramm-meetriast, sest 3D-ruumi taasloomiseks ei ole vaja teada kaamera asukohti ja samuti ei pea olema võrgustikku kindelpunktidest, mille asukohad 3D-ruumis oleks teada. Kaamera asukohad leitakse iteratiivse protsessi teel kiirtekimpe järjest omavahel sobitades. Westoby jt (2012) lisavad, et selliselt leitud kaamera asukohtadel puudub mõõtkava ja orientatsioon ning reaalse ruumiga sidumiseks oleks ikkagi vaja objektiga siduvaid kontrollpunkte. 3D-mudeli loomise erinevatest vaatenurkadest tehtud fotodelt võtavad Ducke jt (2010) oma artiklis kokku järgmiste etappidena: iseloomulike punktide tuvastamine fotodelt, fotode sobitamine, kasutades neidsamu iseloomulikke punkte, tiheda punktipilve loomine ja viimasena pinnamudeli loomine.

Piltide sobitamiseks on vaja kõigepealt leida pildilt iseloomulikud punktid, mida omavahel sobitama hakata. Selleks on loodud sobitamise algoritmid (*Matching Algorithms*), nagu näiteks SIFT, mille lõi Lowe (2004). Sama algoritmi kasutas oma töös ka Snaveily (2008) ja midagi sarnast, kuid omapoolsete täiendustega kasutatakse ka Agisoft Photoscani programmis (Agisoft 2011). SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) algoritm leiab igale pildile suure hulga iseloomulikke punkte, millele arvutatakse ümbritsevate piksliväärtuste põhjal mõõtkavast ja orientatsioonist sõltu-

matu tunnusvektor. Tunnusvektorid salvestatakse andmebaasi ja piltide sobitamisel hakatakse võrdlema just neid tunnusvektoreid (Lowe 2004).

Pärast fotode sobitamist, kus fotode iseloomulikud punktid on paarikaupa vastavusse seatud, tuletatakse kaamerate asukohad ja orientatsioon, kaamera kalibreerimise parameetrid ning punktide asukohad ruumis. Seda protsessi nimetatakse *Structure from Motion* ja aluseks on siin perspektiivgeomeetria reeglid (Snively 2008, Westoby jt 2012). Lahendatakse see enamasti optimeerimisülesandena, kus ühel pool on kaamerate asukohad, kaamera kalibreerimise parameetrid ja fotografeeritava objekti ruum ning teisel pool fotod, mis salvestavad kiirtekimbu foto-grafeerimise hetkel. Tüüpiliselt minimeeritakse näiteks kollineaarsusvõrranditega kirjapandud punktide fotol prognoositud asukohtade ja nende tegelike ehk mõõdetud asukohtade vahelisi erinevusi – põhimõtteliselt toimub kiirtekimpude sobitamine, kasutades mittelineaarset vähimruutude meetodit.

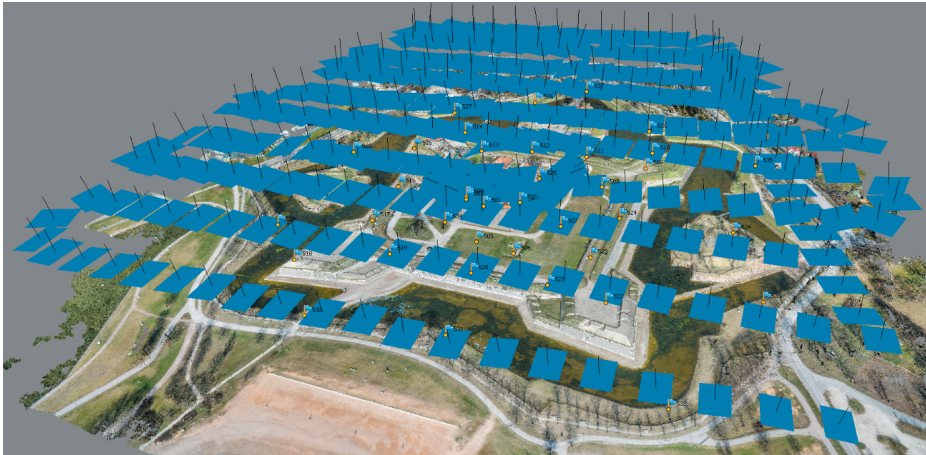
Pärast eelnevate parameetrite leidmist ja esialgse 3D-mudelini jõudmist oleme Agisoft Photoscani mõistes jõudnud hõreda punktipilveni. Hõreda punktipilve moodustavadki piltidelt leitud ja omavahel kokku viidud iseloomulikud punktid, millele on leitud asukoht ruumis. Edasi leiavad kasutust juba MVS (*Multiview Stereo*) algoritmid, mis arvutavad fotode põhjal, mille tegemise asukohad (kaamera asukoht) on teada, tiheda punktipilve (Seitz jt 2006). Saadud tiheda punktipilve põhjal saab teha maapinna mudeli ja seda saab kasutada ortofotode tegemisel lähtekohana, mille alusel fotod ortorektifitseeritakse ja kokku mosaiigitakse.

UAV fotogramm-meetria erineb tavafotogramm-meetriast veel mõne nüansi poolest, mis on tingitud UAV-platvormi spetsiifikast. UAV-d on suhteliselt kerged ja nende trajektoor õhus mõnevõrra ebastabiilne, mistõttu on piltide ülekatted ja pöördenurgad väga varieeruvad, lisaks võib piltide piires oluliselt varieeruda ka mõõtka, kui pildid on tehtud kaldu või eri kõrgustelt. Seepärast on UAV fotogramm-meetria tunduvalt sarnasem lähifotogramm-meetria kui klassikalisele aerofotogramm-meetria (Remondino jt 2011). Samad põhjused, miks klassikaline aerofotogramm-meetria ja automaatne aerotriangulatsioon jääb UAV-fotode osas raskustesse, toovad välja ka Ai jt (2015) ja lisavad, et tunduvalt suurema fotode hulga tõttu on see veel keerulisem ja võib sootuks ebaõnnestuda.

Andmete kogumine

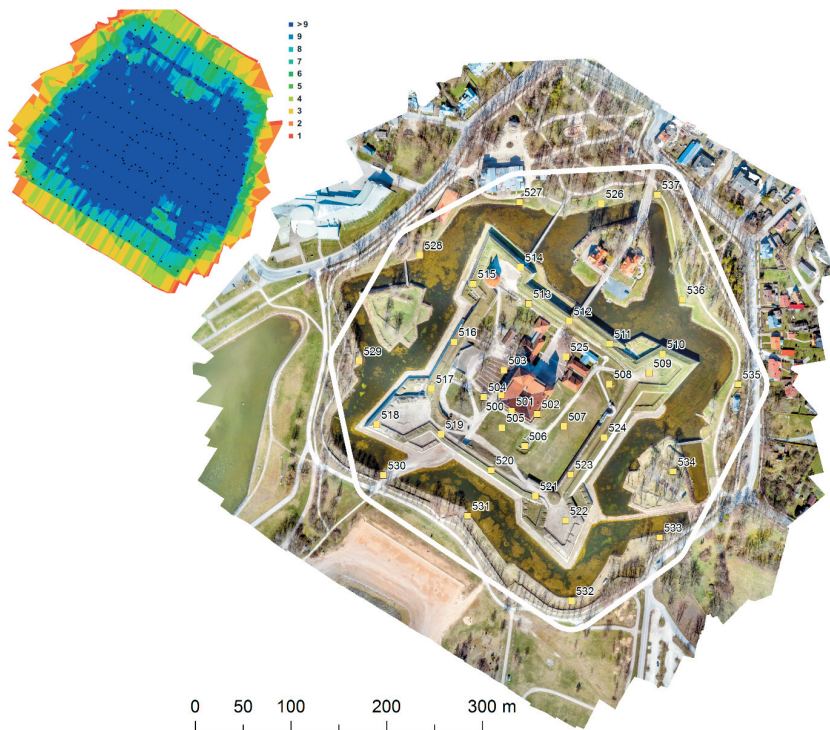
Uurimisalal, milleks oli Kuressaare loss ja selle vahetu ümbrus, tähistati 10x10 cm valge paberiga 38 kontrollpunkti. Seejärel sooritati ettevalmistatud plaani järgi UAV-ga fotode kogumise lend. Kasutatud UAV on 4,2 kg raskune heksakopter, mida kontrollib Pixhawk'i pardaarvuti ja millele annab volu üks 6s 12 000 mAh aku. Pildistamisel kasutati Sony α 5100 fotoaparaati 16 mm objektiiviga, mis on UAV küljes kahte telge stabiliseeriva gimbaliga.

UAV-ga piltide kogumise lennust annab ülevaate joonis 1. Kokku valiti tehtud fotodest välja 240, mille alusel loodi uuritavast alast mudelid. Lend fotode hankimiseks toimus lennuplaani järgi esmalt 90 m kõrgusel (nadiirfotod) ja teises etapis pildistati umbes 60 m kõrguselt 24 kaldfotot, lennates ringiga ümber lossi suunaga lossi poole.



Joonis 1. Ülevaade uuritavast alast, lennust ja fotode asukohtadest.

Maa peal tähistatud 38 kontrollpunkti mõõdistati RTK GPS-iga (Topcon HiPer V), mis saab reaalajas asukohaparandi üle andmeside. Ideaalis on mõõdistuse täpsus ligikaudu 2 cm horisontaalis ja 5 cm vertikaalis. Maapealsete kontrollpunktide paiknemisest annab ülevaade joonis 2.



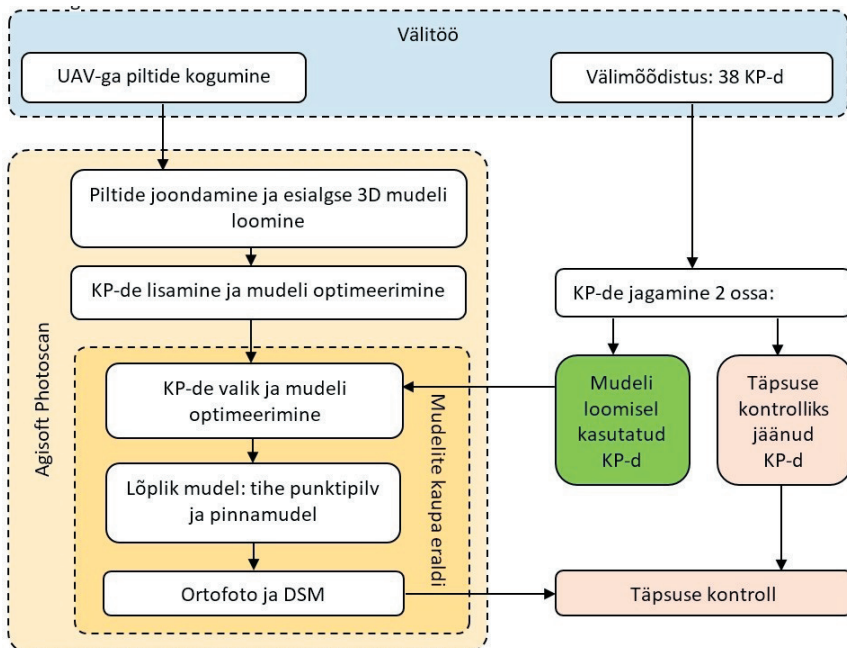
Joonis 2. Kontrollpunktide paiknemine uurimisalal ja ortofoto, mis on valmistatud kasutades kõiki 38 kontrollpunkti. Üleval vasakus nurgas olev diagramm näitab, kuidas fotod uuritavat ala katavad.

Metoodika

Töö metoodika võtab kokku joonisel 3 toodud skeem. Pärast välitööd laaditi kõik 240 fotot programmi Agisoft Photoscan, kus pildid joondati (*Align Photos*). Joondamine tähendab eelnevalt kirjeldatud teooria osas nimetatud piltide omavahelist sobitamist ja SfM töövoogu: programm leiab fotodelt iseloomulikud punktid, arvutab nendele tunnusvektorid, mille alusel ta fotod omavahel kokku paneb, ja siis leiab kaameratele ja punktidele asukoha ruumis. Ühtlasi arvutatakse välja ka kaamera orienteerimise ja kalibreerimise parameetrid. See tähendab, et piltide joondamise lõppedes valmib ka esmane 3D-mudel koos hõreda punktipilvega.

Pärast piltide joondamist lisati mudelile kõik 38 kontrollpunkti ja täpsustati mudeli koordinaatsüsteemiks Eestis kasutatav L-EST 97 koordinaatsüsteem. Seejuures tuli iga kontrollpunkt paika panna kõikidel fotodel, kuhu see peale jäi, näiteks asus kontrollpunkt 506 kokku 20 erineval fotol, mis tuli kõik ette näidata.

Järgmise sammuna tuleb Agisofti töövoos optimeerimine (*Optimize*), kus kogu esialgne mudel arvutatakse ümber, lähtudes etteantud kontrollpunktidest, mille järel saab mudel endale reaalsed koordinaadid. Optimeerimisest alates oli tööprotsess mudelipõhine, nimelt valiti välja ainult teatud arv sobiva paigutusega kontrollpunkte, mida kasutati mudeli loomiseks. Kokku loodi 17 erinevat mudelit, mis tähendab 17 erinevat ortofoto ja kõrgusmudeli komplekti. Ülevaate kõikidest mudelitest annab tabel 1. Kõrgusmudeli puhul on antud juhul tegemist pinnamudeliga, kus ei kajastu ainult reljeef, vaid ka sellel asuvad objektid (näiteks ehitised) ja taimestik.



Joonis 3. Metoodika skeem.

Iga mudeli jaoks valiti välja vastav kogus sobiva paigutusega kontrollpunkte, misjärel mudel optimeeriti, kasutades ainult neid kontrollpunkte, ehk siis lasti 3D-mudel ümberarvutada, lähtudes täiendavast teabest, mille programmi saab kontrollpunktide koordinaatidest. Kontrollpunktide valiku põhimõtte mängis rolli esialgne veahinnang, mida programm koordinaatide juures näitab, nimelt üritati valida väiksema veaga punkte. Pärast optimeerimist lasti programmil arvutada tihe punktipeil, mille alusel koostati juba pinnamudel. Pinnamudeli põhjal eksporditi reljeefimudel ja ortofoto, mille tarbeks fotode ortorektifitseerimine ja mosaiikimine toimus programmis täisautomaatselt.

Saadud ortofotode alusel hinnati tulemuse horisontaalset täpsust ja reljeefimudeli alusel vertikaalset täpsust. Horisontaalse täpsuse hindamiseks osutati ortofotodel uuesti kontrollpunktide asukohad ja võrreldi uute asukohtade koordinaate mõõdistusandmete koordinaatidega. Koordinaatide erinevuste põhjal arvutati ruutkeskmised vead X- ja Y-koordinaatidele (vastavalt RMS X ja RMS Y), mis omakorda võeti kokku ruutjuurena ruutude summast RSS XY (*Root Sum Square*). Vertikaalse vea hindamiseks võeti kontrollpunktide kõrgused uuest asukohast ja kõrgused mõõdistuse järgi ning nende erinevuste põhjal arvutati samamoodi ruutkeskmised viga Z-koordinaadi osas (RMS Z). Vigade arvutamisel kasutati neid kontrollpunkte, mida ei kasutatud mudeli loomisel (tabel 1).

Parema ettekujutuse saamiseks, kuidas KP-de valik mõjutab 3D-mudeli loomisel kõrguse kujunemist, viidi läbi ka kõrgusmodelite lahutamine. Etaloniks võeti kõrgusmudel, mis on loodud kõiki kontrollpunkte kasutades (mudel: lest_koik, joonis 6) ja arvutati kõikide teiste kõrgusmodelite erinevus etalonist lihtsa lahutus-tehte abil.

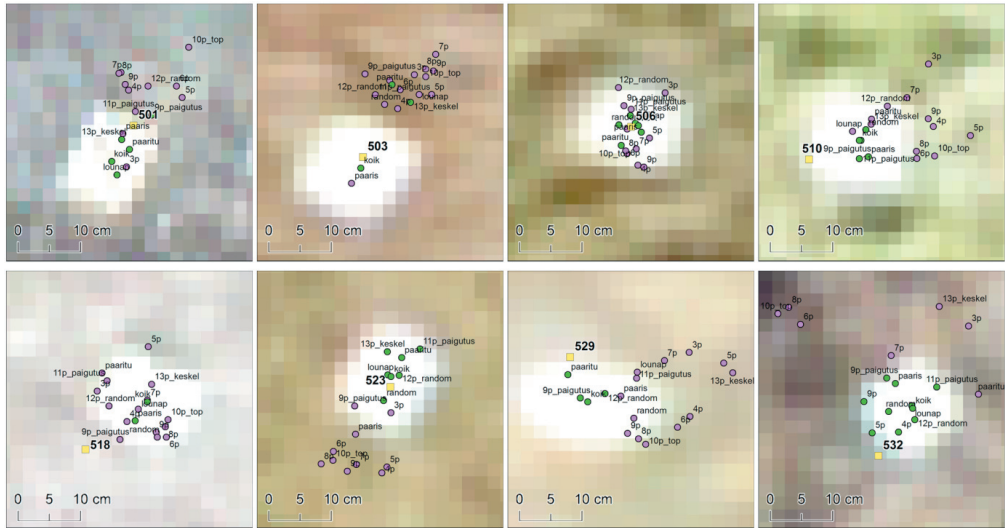
Tabel 1. Kõikide loodud mudelite ülevaade (roheline – mudeli loomisel kasutatud KP-d; roosa – täpsuse kontrolliks kasutatud KP-d).

Mudel	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	KP arv	KP'de valiku põhimõte
3p																																							3	Väike RMS ja hästi ala katvad KP'd
4p																																							4	Väike RMS ja hästi ala katvad KP'd
5p																																							5	Väike RMS ja hästi ala katvad KP'd
6p																																							6	Väike RMS ja hästi ala katvad KP'd
7p																																							7	Väike RMS ja hästi ala katvad KP'd
8p																																							8	Väike RMS ja hästi ala katvad KP'd
9p																																							9	Väike RMS ja hästi ala katvad KP'd
9p_paigutus																																							9	Saavutada ühtlasem katvus kui 9p'l
10p_top																																							10	Võimalikult väike RMS ja hästi ala katvad KP'd
11p_paigutus																																							11	Võimalikult hästi ala katvad KP'd
12p_random																																							12	12 juhuslikku KP'd
13p_keskel																																							13	13KP'd uuritava ala keskosast
loaunap																																							19	Pooled KP'd ala lõuna poolelt
paaritu																																							19	Kõik paaritu ID'ga KP'd

Tulemused ja arutelu

Tulemuste interpreteerimisel on oluline arvestada ka mõõtmis- ja digimisvigadega, mis annavad lõplikku veahinnangusse oma panuse. Siin on kolm asjaolu, mida silmas pidada. Esiteks kontrollpunktide mõõdistamise täpsus, mis jääb horisontaalis ideaalis 2 cm juurde ja vertikaalis umbes 5 cm juurde. Lisaks sellele mõjutab täpsust kontrollpunktide asukohtade osutamine enne mudeli loomist Agisoft Photoscani tarkvaras ja seal jääb see umbes 1–2 pikslit piiresse, mis

arvestades piksli suurust teeb 2–4 cm. Valminud ortofotolt täpsuse kontrollimise jaoks uuesti kontrollpunktide osutamise täpsus on jällegi 1–2 piksli ehk 2–4 cm (joonisel 4 on toodud valik kontrollpunkte ja nende asukohad erinevatel loodud mudelitel). Seega saame rääkida horisontaalse vea puhul määramatusest suurusjärgus 6–10 cm. Vertikaalse vea puhul on määramatus suurem, sest mõõdistusandmete täpsus on seal 5 cm piires, aga lisandub veel horisontaalne viga, mis tähendab, et kõrgust kontrollitakse selle võrra vale koha pealt.

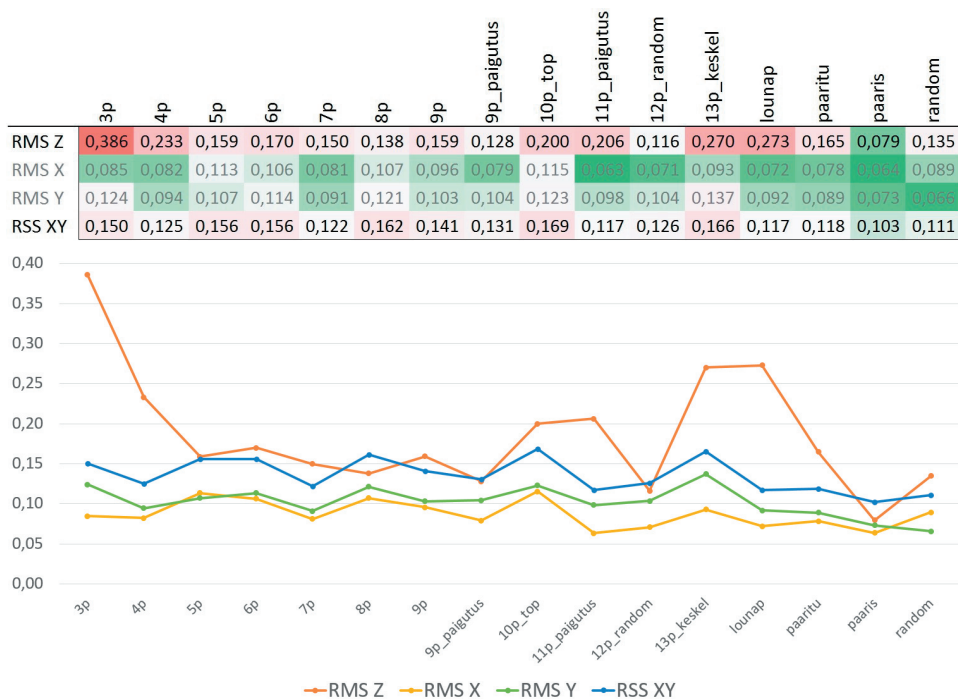


Joonis 4. Valik kontrollpunkte, taustal ortofoto, mis on tehtud kõiki kontrollpunkte kaasates (mudel: lest_koik). Ülejäänud punktid näitavad sama kontrollpunkti asukohti teiste mudelite ortofotodel. Roheline värv näitab, et see kontrollpunkt oli kaasatud mudeli loomisse, ja lilla tähendab, et seda kontrollpunkti kasutati täpsuse kontrolliks.

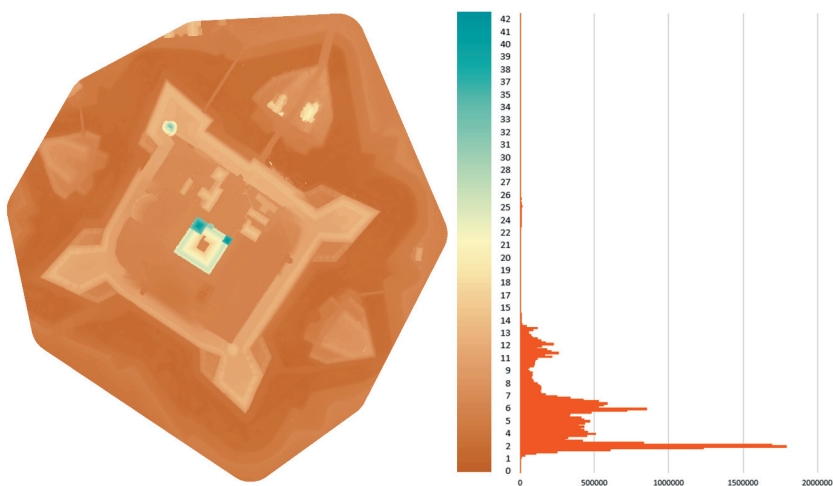
Väljaarvutatud vigade alusel saab öelda, et kõige täpsem mudel on paarisarvuliste kontrollpunktidega loodud mudel, kus RMS Z on 7,9 cm ja horisontaalne viga RSS XY on 10,3 cm. Kõige suurema vertikaalse veaga on 3 kontrollpunkti põhjal tehtud mudel (3p), kus RMS Z on 38,6 cm – ilmselt on see põhjustatud liiga vähestest kontrollpunktidest. Joonisel 5 toodud graafikult on näha, et horisontaalne täpsus on palju stabiilsem ja isegi vähestepunktide korral täiesti aktsepteeritaval tasemel. Kõrguse usaldusväärsemaks paikasaamiseks on aga vaja rohkem punkte. Ja hoolimata punktide arvust ei ole soovitatav kasutada kontrollpunktidega kaetud piirkonnast väljapoole jäävaid servaalasid.

Väga ilmekalt kerkivad esile oma suhteliselt suure vertikaalse ebatäpsusega mudelid 13p_keskel ja lounap. Selle põhjuseks on mudeli loomisel kasutatud kontrollpunktide valik, mis ei kata uurimisala ühtlaselt ja rõhutab liialt mingit osa uurimisalast. Esimesel juhul on kontrollpunktid ainult mudeli keskosas (joonis 7), mis põhjustab kõrguse moonutusi mudeli servaaladel. Teisel juhul on võetud pooled punktidest, aga ainult lõunapoolsed punktid, mis põhjustab suuremaid kõrgusväärtuste moonutusi põhjapoolsel alal.

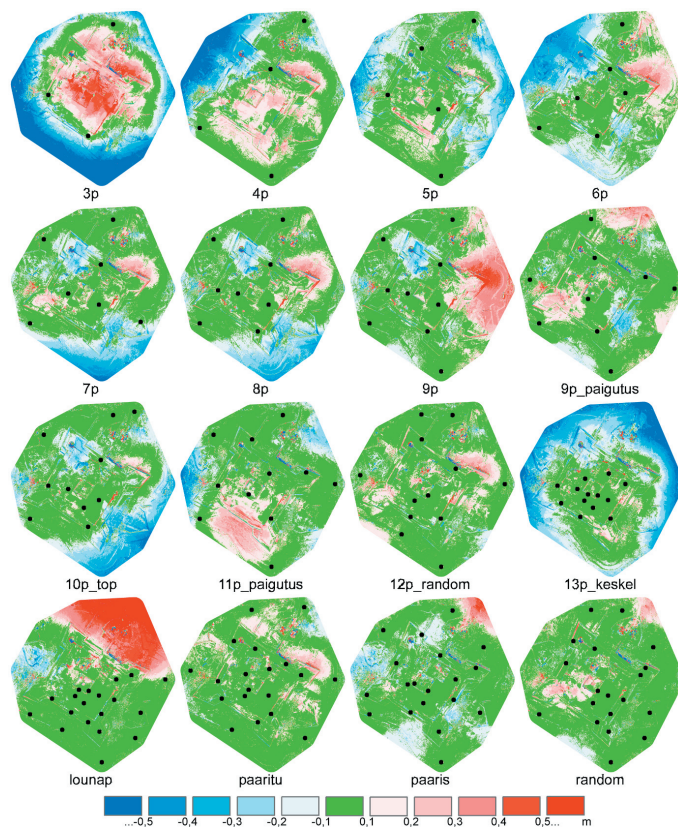
Üldiselt on saavutatav täpsus päris hea, kui arvestada ka antud lähteandmestiku mõõtmistäpsusi ja kontrollpunktide määramise täpsust. Tehtud analüüs annab julgustava signaali, et UAV fotogramm-meetria on mõõtmisel ja kaardistamisel täiesti kasutatav meetod.



Joonis 5. 3D-mudelite horisontaalne (RSS XY) ja vertikaalne täpsus (RMS Z).



Joonis 6. Mudeli lest_koik baasil loodud pinnamudel ja selle kõrguste sagedusjaotus.



Joonis 7. Pinnamudelite lahutamisel saadud tulemused. Kõikidest toodud pinnamudelitest on lahutatud kõikide kontrollpunktide põhjal loodud pinnamudel (model: lest_koik).

Viidatud kirjandus

- Agisoft. (2011). <http://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=89.0>, viimati vaadatud: 12.09.2016.
- Ai, M., Hu, Q., Li, J., Wang, M., Yuan, H., Wang, S. (2015). A Robust Photogrammetric Processing Method of Low-Altitude UAV Images. *Remote Sensing* 7, 2302–2333.
- Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., Gattelli, M. (2015). Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sensing* 7, 4026–4047.
- Chiabrando, F., Nex, F., Piatti, D., Rinaudo, F. (2011). UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: two tests in the Piedmont region (Italy). *Journal of Archaeological Science* 38, 697–710.
- Dandois, J.P., Ellis, E.C. (2010). Remote Sensing of Vegetation Structure Using Computer Vision. *Remote Sensing* 2, 1157–1176.

- Ducke, B., Score, D., Reeves, J. (2010). Multiview 3D reconstruction of the archaeological site at Weymouth from image series. *Computers and Graphics* 35, 375–382.
- Eisenbeiß, H. (2009). UAV Phtogrammetry. Phd Thesis, ETH Zutich.
- Hugenholtz, C.H., Whitehead, K., Brown, O.W., Barchyn, T.E., Moorman, B.J., LeClair, A., Riddell, K., Hamilton, T. (2013). Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology* 194, 16–24.
- http1: <http://www.smalluavcoalition.org/infrastructure-inspection/>, viimati vaadatud: 12.09.2016.
- http2: <http://www.cs.cornell.edu/~snave/bundler/>, viimati vaadatud: 12.09.2016.
- Lehmann, J.R.K., Münchberger, W., Knoth, C., Blodau, C., Nieberding, F., Prinz, T., Pancotto, V.A., Kleinebecker, T. (2016). High-Resolution Classification of South Patagonian Peat Bog Microforms Reveals Potential Gaps in Up-Scaled CH₄ Fluxes by use of Unmanned Aerial System (UAS) and CIR Imagery. *Remote Sensing* 8, 173.
- Lowe, D.G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60, 91–110.
- Luna, I., Lobo, A. (2016). Mapping Crop Planting Quality in Sugarcane from UAV Imagery: A Pilot Study in Nicaragua. *Remote Sensing* 8, 500.
- Remondino, F.; Barazzetti, L.; Nex, F.; Scaioni, M.; Sarazzi, D. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives. In Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g), Zurich, Switzerland, 14–16 September 2011.
- Salamí, E., Barrado, C., Pastor, E. (2014). UAV Flight Experiments Applied to the Remote Sensing of Vegetated Areas. *Remote Sensing* 6, 11051–11081.
- Seitz, S.M., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D., Szeliski, R. (2006). A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms, in: 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Presented at the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 519–528.
- Snavey, N. K. (2008). Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections. Phd thesis, University of Washington.
- Uysal, M., Toprak, A.S., Polat, N. (2015). DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement* 73, 539–543.
- Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., Turner, D. (2012). Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory. *Remote Sensing* 4, 1519–1543.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M. (2012). “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300–314.

Accuracy of orthophoto and DSM created from UAV collected data

Summary

Unmanned Aerial Vehicles (UAV) are getting cheaper and more available that has increased also their usage. In addition to their fun aspect of just flying around there are more and more different applications emerging. Photography was one of the first applications and very quickly it developed into orthophotos and mapping. 3D models created from these photos are also very common and a lot of examples from geomorphology and archaeology can be found. There are also several comparisons of this methodology to other methodologies like total station measurements and terrestrial laser scanning. As a result it was concluded that using UAVs allowed to get the same accuracy level or even better, but with less time and much cheaper.

This article is about 3D models derived from UAV imagery and evaluating their accuracy using created orthophotos for horizontal accuracy and DSM for vertical accuracy. To create a 3D model out of UAV imagery principles of photogrammetry are applied. Due to some specific characteristics of UAV images compared to images used in traditional photogrammetry there is some difference in processing principles. In short, powerful computer graphics and image processing algorithms are developed that can do image matching making possible Structure from Motion and Multi View Stereo algorithms to produce detailed 3D point clouds from photographs.

Total number of 17 different 3D models with different number and layout of control points were created out of one dataset (216 nadir photos from flying height 90m and 24 tilted photos around the Kuressaare castle from 60m above ground) acquired with UAV. Agisoft Photoscan software was used. Orthophotos with ground resolution of 2cm and DSMs (GSD 8 cm) were created out of all the models and then compared to ground control points (GCP) surveyed with RTK GPS. Horizontal accuracy (Root Sum Square of X and Y) varied between 16,9 and 11,1 cm. Worst vertical accuracy of $RMS\ Z = 38,6\text{ cm}$ was achieved by using model with only 3 GCP's. Best vertical accuracy was $RMS\ Z = 11,6\text{ cm}$. For better understanding how z values differ throughout DSMs depending on model's GCP selection the DSM created using all GCPs was subtracted from all other DSMs and differences were visualized. There is a clear pattern of more similar z values closer to GCPs used for model creation. To achieve high accuracy enough points and good coverage is needed especially for accurate z values. Taking into consideration the measurement errors of RTK GPS and digitizing control points we can estimate the level of uncertainty somewhere between 6-10cm. All in all achieved accuracy is encouraging and UAV photogrammetry can be used as a method for different applications.

Puistute biomassi ja süsiniku hulga hindamine kaugseire abil

Mait Lang^{1,2}, Tauri Arumäe¹, Maris Nikopensius^{1,3}

1 Eesti Maaülikool, metsandus- ja maaehitusinstituut, Kreutzwaldi 5, Tartu 51014

2 Tartu Observatoorium, Tõravere, Nõo vald, Tartumaa 61602

3 Keskkonnaagentuur, Mustamäe tee 33, Tallinn 10616

Kokkuvõte

Aegviidu katsealal koostati puistute biomassi seotud süsiniku M_C (t C/ha) kaart. Selleks arvutati esmalt allomeetrilise mudeliga 410 proovitüki puudele biomassi hinnangud ja siis kasutati hektari kohta üldistatud biomassi ning aero-lidari meetrikute põhjal hinnatud tüvemahu seost. Analüüsiti ka metsa-ressursi arvestuse riikliku registri andmebaasis olevate puistute takseerikirjelduste kasutamise võimalusi. Selgus, et andmebaasist analüüsiks võetud 4095 puistu takseerikirjelduste järgi saadud keskmine M_C hinnang on oluliselt väiksem (56 t C/ha) võrreldes proovitükkidel põhineva mudeliga aerolidari mõõtmisandmetelt hinnatuga (67 t C/ha). Aegviidu katseala kõikide metsamaal kasvavate takseeritud puistute $M_C = 70$ t C/ha ja kosmosepiltidel põhineval metsakaardil piiritletud metsades $M_C = 69$ t C/ha. Metoodika on kasutatav kõikjal, kus on olemas suvised aerolidari mõõtmisandmed, kuid Aegviidu katseala metsadest oluliselt teistsugustes puistutes (näiteks lehtpuumetsad viljakatel kasvukohtadel) võib osutuda vajalikuks lähendada mudelitele täpsemad parameetrid.

Võttesõnad: aerolidar, puistu biomass, süsinikuringe

Sissejuhatus

Metsa biomassi peamised varud on mullas, puistus ja vähemal määral ka puistu alustaimestik (Kõlli 1988, Kõlli jt 2004). Puistu – metsa ühe olulise komponendi biomassi moodustavad lehed, tüvepuu, koor, kändud ning juured. Lehtede ja peenjuurte mass on muutlik, aga puistu biomassist moodustavad nad suhteliselt väikese osa (Varik 2014). Kliimamuutuste kontekstis on oluline metsas ladestunud süsiniku hulk, mille sisalduseks puittaimede absoluutkuivas biomassis võib võtta $0,5 \text{ g g}^{-1}$. Üksikpuude biomassi hinnatakse regressioonimudelitega, mille argumentideks on puutüve rinnasläbimõõt (d) ja kõrgus (h) (Marklund 1988) või lisatakse ka puidu tihedus (Chave jt 2005). Puistu biomassi hindamiseks sobivad hästi rinnaspindalal (G) ja kõrgusel (H) põhinevad mudelid (Cannell 1984).

Metsa takseerandmetes oleva puude või puistu tüvemahu järgi saab biomassi hinnata ka niinimetatud laiendustegurite kaudu (*biomass expansion factors* – BEF), mis annavad puistu erinevate fraktsioonide (lehed, oksad, tüvi, koor, juured) kuiva massi (M_i) ning tüvemahu (V) suhte: $B_{EF} = M_i / V$. Täpsema biomassi hinnangu saamiseks tuleb arvestada, et laiendustegurid sõltuvad puistu vanusest, kasvukoha-tüübist ja peapuuliigist (Levy jt 2004, Pajik jt 2011).

Eestis on statistilise metsainventuuri (SMI) hinnangutel metsamaa pindala 2,27 miljonit hektarit ja koorega tüvepuidu kogumaht 483 miljonit m³ (Mets 2016). Statistilised kokkuvõtted (Mets 2016) näitavad, et Eesti võsastub ja kasvab metsa ning viimase 72 aastaga on metsamaa pindala suurenenud 54%. Kui palju võiks Eestis praegusel metsamaal kasvav mets pidada kinni süsinikku? Metsamullas on orgaanilist ainet, peamiselt turvast, Eestis keskmiselt 299 t/ha, milles on süsinikku 156 t C/ha (Kõlli jt 2004). Puistute keskmise hinnangu saamiseks kasutame puistute pindala ja keskmisi boniteete peapuuliigi järgi (Mets 2016), Tappo (1982) koostatud mudeleid ja IPCC (2003) meetodikast valemit 3.2.3. Kui kõik metsad oleksid vanad ja keskmiselt sama hõredad kui praegu, siis saaksime puistutes fikseeritud süsiniku hulgaks $M_C \approx 100$ t C/ha; kui need metsad oleksid aga täiusega 1,0, siis $M_C \approx 140$ t C/ha. Espenbergi jt (2013) pakutud ilma raieeta metsa-majanduse stsenaariumi korral, milles on arvestatud ka puistute vanuselist jaotust, oleks aastal 2050 $M_C \approx 90$ t C/ha. Praegu on puistute keskmine $M_C \approx 76$ t C/ha, kui aluseks võtta SMI (Mets 2016) järgi tüvemaht ning metsamaa pindala. Järgides arvutustes täpselt IPCC (2006) uut meetodikat, saame hinnanguks $M_C = 72,4$ t C/ha. Eeltoodud hinnangud sõltuvad metsa ja metsamaa definitsioonist, puistute vanuselise jaotusest ja biomassi laiendustegurite ning kliimavööndi valikust. Täpsemate M_C hinnangute saamiseks metsade erineva struktuuri korral tuleb kasutada metsa kasvukäigu- ja majandamismudeleid koos muldade andmetega.

Biomassi hetkeseisu hindamiseks saab alandmed metsa instrumentaalselt mõõtes, nagu tehakse SMI välitöödel, või takseerides puistuelemente (Krigul 1972) sarnaselt metsakorraldustöödele. Need mõõtmised on aeganõudvad ning kulukad ja suurtel aladel andmete uuendamiseks ja kaartide koostamiseks tuleb seega kasutada lisaks multispektraalseid kosmosepilte ning aerolidari (ALS) mõõtmisandmeid (Lang jt 2014). Metsa spektraalne heledus sõltub sellistest teguritest nagu puistu liigiline koosseis ja lehemass. Noore metsa heledus kahaneb tavaliselt kiiresti koos vanuse kasvuga ja jääb liitunud, üle kolmekümneaastastes metsades üldiselt vähemuutuvaks olenemata metsa kasvust (Nilson ja Peterson 1994). Kevadtalvistel lumikattega pildidel võimaldab tumeda metsa ja heledate lumega kaetud lagendike kontrast metsade kaardistamist (Peterson jt 2008). ALS-mõõtmisandmed (laserimpulsi peegelduste asukohad puudel) aga sisaldavad infot võrastiku tiheduse ja puistu kõrguse kohta (Lang jt 2012) ja sobivad ka metsa piiritlemiseks (Lang 2013). Puude kõrgus ja rinnaläbimõõt, mida kasutatakse biomassimudelites, on omavahel üsna hästi seotud ja seega on kohane uurida ALS-mõõtmisandmete meetrikute ehk üksikpeegeldustest moodustunud punktiparvi kirjeldavate statistiliste arv-karakteristikute seoseid puistute biomassiga. Punktiparvede näiteid leiab Langi ja Arumäe (2014) artiklist.

Järgnevas näites kasutatakse puistute biomassi seotud süsiniku kaardi koostamiseks Aegviidu katseala ALS-mõõtmisandmeid, proovitükkide takseerandmeid, Repola (2008, 2009) allomeetrilisi biomassimudeleid ja kosmosepiltide-põhist metsade kaarti (Peterson jt 2008). Analüüsitakse ka metsaressursi arvestuse riikliku registri andmebaasis (edaspidi metsaregister; Metsaressursi 2016) olevate metsa-eraldiste andmete kasutamise võimalusi puistute biomassi hindamiseks.

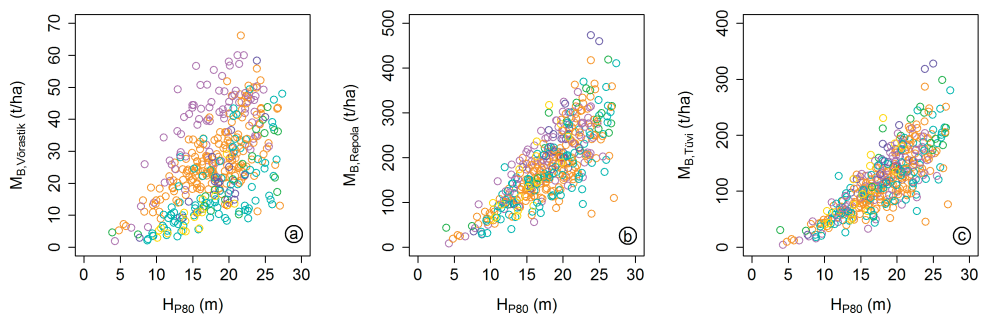
Metoodika ja andmed

Aegviidu 15×15 km katseala, kus domineerivad okaspuupuistud, rajati 2008. aastal aerolidari mõõtmisandmetel põhineva metsatakseerimise metoodika arendamiseks (Anniste ja Viilup 2011, Lang jt 2012). Katsealal asub 410 täpse asukohamääranguga ringproovitükki, mille raadius on 7–15 m sõltuvalt puistu vanusest. Proovitükil oleva puistu takseerikirjelduse saamiseks klupiti kõik puud ja mõõdeti mudelpuudel kõrgused (Anniste ja Viilup 2011). Igale puule arvutati d ja h järgi tüvemaht v ja allomeetriliste mudelitega (Repola 2008, 2009) lehestiku, elusokste, surnud okste, tüvepuidu, tüve koore, kännu ja jämejuurte biomass, mille summa andis kogu puu biomassi $m_{B,Repola}$ kilogrammides. Võra biomassina $m_{B,Võra}$ käsitletakse siin lehestiku, elusokste ja surnud okste masside summat ja tüvemassi $m_{B,Tüvi}$ moodustavad tüvepuu ning koor. Lehtpuude jaoks kasutati kaskede mudelit. Üksikpuude biomasside põhjal saadi vastavalt puistu tasemel hinnangud $M_{B,Repola}$, $M_{B,Võrastik}$ ja $M_{B,Tüvi}$ (t/ha).

Metsaregistris on andmeid enamiku Aegviidu katseala puistute kohta. Metsaregistri andmebaasist võeti 4095 eraldist, mille inventeerimisaasta jäi vahemikku 2006–2010 ja millel oli tüvemaht $V_{MREG} > 0$. Arvestades Eesti metsade takseertunnuste keskmisi juurdekasve ja majandamise intensiivsust, ei muuda kaheaastane erinevus laserskaneerimise ajast katsealal takseertunnuste ja lidarimeetrikute vahelisi seoseid. Metsaregistris on puistuelementide keskmised takseertunnused (puuliigi osakaal, puude keskmine kõrgus, rinnasläbimõõt, puude arv, tüvemaht jne) eraldiste kaupa. Eraldiste biomassid arvutati iga puistuelementi kirjeldava keskmise puu andmete ja elemendi puude arvu järgi.

Aerolidarmõõdistuse tegi 2008. aasta suvel Maa-amet skanneriga Leica ALS50-II lennukõrgusel 2400 m ja punktitiheiduseks saadi 0,45 peegeldust/m². Punktiparvede töötamiseks kasutati vabavara FUSION (McGaughey 2014). Laserandmete töötusprotsess on sarnane Arumäe ja Langi (2016) uurimuses kasutatule. Laserandmetest filtreeriti esmalt maapinnalähedased peegeldused, kasutades moodulit *GroundFilter*. *GridSurfaceCreate* mooduliga koostati maapinna kõrgusmodel (DTM – *digital terrain model*). Seejärel lahutati DTM peegelduste üldisest punktipilvest *ClipData* mooduliga. Maapinna kõrguse suhtes normeeritud punktipilvest lõigati 10 m sisse puhverdatud metsaeraldiste piiride või ringproovitüki tsentrite koordinaatide ning raadiuste järgi punktipilved mooduliga *PolyClipData*. Metsaeraldiste ja proovitükkide jaoks eraldatud pilvedele arvutati meetrikud mooduliga *CloudMetrics*. Edasises analüüsis kasutati punktiparve kõrgusjaotuse 80-protsentiili H_{p80} , 25-protsentiili H_{p25} ja impulsi kõiki peegeldusi arvestavat 1,3 m kõrgusel eristusnivool arvutatud katvust K . Katvuse arvutamisest on täpsemalt kirjutanud Lang (2010). ALS-meetrikutel põhineva puistute biomassi hindamise meetodi valimiseks uuriti esmalt puistu kõrgust kirjeldava H_{p80} seoseid biomassi fraktsioonidega (joonis 1). Selgus, et H_{p80} kirjeldab üsna hästi nii tüvemassi kui ka kogumassi olenemata enamuspüüligist, kuid võrastiku massi puhul oli siiski tuntav seose püüliigimatus.

Kuna puistu tüvemaht V on hästi seotud puistu kõrgusega, siis biomassi hindamiseks otsustati kasutada biomassi laiendustegurite meetodile sarnast võtet, kus puistu tüvemaht teisendatakse biomassi hinnanguks. Nii saab kasutada juba

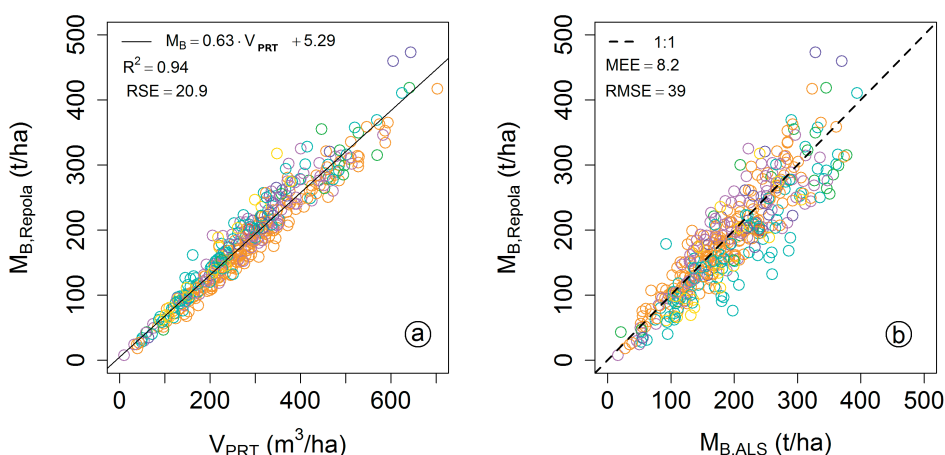


Joonis 1. Puistute võrastiku biomassi (a), summaarse biomassi (b) ja tüvemassi (c) ning aerolidari impulsi peegelduste kõrgusjaotuse 80-protsentiili (H_{P80}) seosed proovitükkidel. Enamesinevad puistud: lilla – kuusik, oranž – männik, helesinine – kaasik.

olemasolevaid kaugseireandmetele tuginevaid puistute tüvemahu mudeleid ja arvutuskeem onsarnane IPCC metoodikale. Seega lähendati proovitükkidel puistute tüvemahu V_{PRT} ning biomassi seost kirjeldava lineaarseose (joonis 2a)

$$M_B = a \cdot V + b \quad (1)$$

parameetrid ning saadi $a=0,63$ ja $b=5,29$. Parameetri a väärtust võib käsitleda ka biomassi laiendustegurina. Mudeliga (1) teisendati Aegviidu katseala ALS-põhine tüvemahu hinnang V_{ALS} (Arumäe ja Lang 2016) proovitükkidel biomassi hinnanguks $M_{B,ALS}$ ja võrreldi takseerandmete järgi arvatud biomassiga $M_{B,Repola}$ (joonis 2b). Nii saadi teisenduse keskmiseks veaks (2) MEE=8,2 t/ha ja ruutveaks (3) RMSE=39 t/ha. Eeltoodud hajuvuse analüüs ei anna ülevaadet võimalikest tegelikest süstemaatilistest vigadest, mille analüüsimiseks oleks vaja sõltumatut puistute biomassi mõõtmisandmestikku.



Joonis 2. a) Puistute tüvemahut (V_{PRT}) ja Repola (2008, 2009) mudelitega saadud puistu biomassi ($M_{B,Repola}$), b) aerolidari ($M_{B,ALS}$) ja puude mõõtmisandmetel saadud puistute biomassi hinnangud. RSE on mudeli jääkviga.

Keskmine hinnangu viga (MEE) on arvutatud valemiga

$$MEE = \Sigma (X-Y) / N \quad (2).$$

Ruutkeskmine viga (RMSE) on arvutatud valemiga

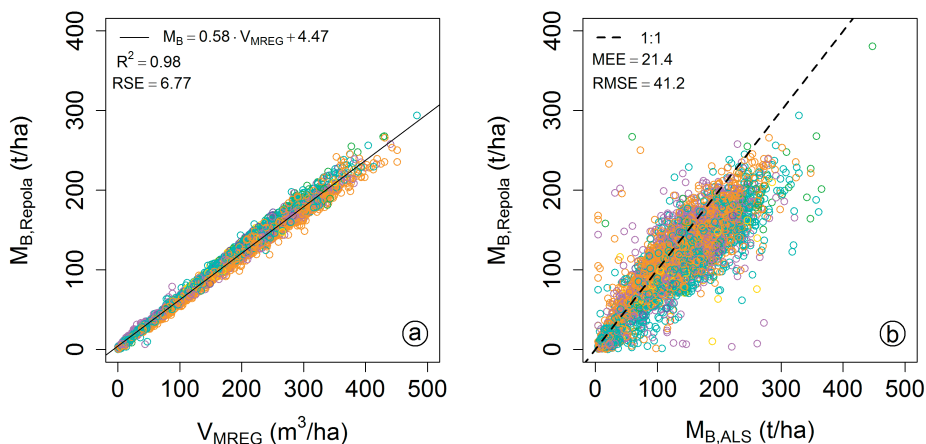
$$RMSE = \sqrt{\Sigma (X-Y)^2 / N} \quad (3),$$

kus X on argument, Y on funktsioontunnus ja N on valimi maht.

Proovitükkide andmetel saadud ALS-põhine biomassi hindamise mudel annab võimaluse analüüsida ka metsaregistri takseerandmete järgi arvutatud puistute biomassi ja nende eraldiste piiride järgi võetud punktipilvede meetrikute alusel hinnatud biomassi seoseid. Metsaregistri andmebaasis on takseerikirjeldused paljude Eesti metsade kohta ja selline lisainfo aitaks täpsustada ka biomassi hinnanguid. Andmetöötamise lõpuks rakendati mudelit (1) katseala ulatuses ja koostati punktipilve meetrikute järgi kogu ala kattev 20-meetrilise ruumilahutusega kaart puistutes seotud süsiniku kohta. Päringute jaoks metsaga ala eraldamiseks kasutati U. Petersoni (Tartu Observatoorium) koostatud kaarti, mida kirjeldavad Peterson jt (2008). Kokkuvõtteks arvutati M_C kaardilt nii metsaregistri andmebaasis olevate eraldiste kui ka kõikide katseala metsade biomassi seotud süsiniku hulga keskmine hinnang.

Tulemused ja arutelu

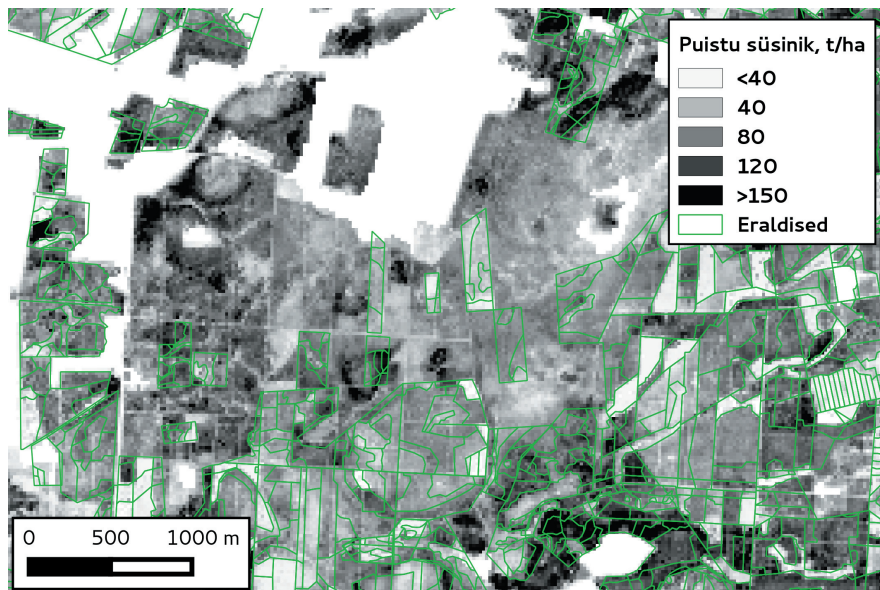
Metsaregistri takseerandmete järgi puistuelementide kaupa arvutatud puistute summaarse biomassi ja tüvemahu seos oli väga tugev ($R^2=0,98$) ja lineaarne (joonis 3a). Seose jääkviga oli palju väiksem kui sarnasel seosel proovitükkidel (joonis 2a), kus biomass arvutati puude kaupa. Seose headuse peamine põhjus nii proovitükkide andmete kui ka takseerandmete puhul tuleneb sellest, et nii tüvemahu kui ka biomassi arvutamiseks kasutatakse samu sisendtunnuseid. Siiski selgus, et takseerandmetel lähendatud lineaarseose (1) tõusu a väärtus,



Joonis 3. a) Metsaregistri eraldiste tüvemah (V_{MREG}) ja Repola (2008, 2009) mudelitega saadud puistu biomass ($M_{B,Repola}$), b) lidarmõõtmise andmetel ($M_{B,ALS}$ mudel (1)) ja eraldiste takseerandmete põhjal saadud puistute biomass.

mida võiks käsitleda biomassi laiendustegurina, on veidi väiksem ($a=0,58$) proovitükkidel saadust. Erinevuse põhjuseks võib olla nende andmestike puhul kasutatud erinev tüvemahu arvutamise eeskiri või siis fakt, et üksikpuude biomassimudelit rakendati puistuelemendi keskmistel andmetel. Takseerandmete puhul ilmnes ka seose puuliigiomasus – sama tüvemahu korral on Repola (2008, 2009) mudelite järgi kaasikute biomass kõige suurem ja männikute biomass kõige väiksem. Võrreldes takseerandmetest arvutatud biomassi hinnangut proovitükkidel põhineva mudeliga (1), mille argumendiks oli eraldise piirest võetud punktisarve meetrikutel põhinev tüvemaht V_{ALS} , selgus, et vanemates puistutes on takseerandmete järgi saadud biomass süstemaatiliselt väiksem kui V_{ALS} -põhine hinnang (joonis 3b). Nii tuleb nende 4095 eraldise takseerandmete järgi keskmiseks puistus seotud süsiniku hinnanguks $M_C=56$ t C/ha, aga proovitükkidel põhineva mudeliga $M_C=67$ t C/ha, mis on oluliselt sarnasem Eesti keskmisega. Arvatavasti on erinevuste põhjused samad, mida tüvemahu hindamise puhul kirjeldasid Arumäe ja Lang (2016) ja alla on hinnatud takseerandmetes biomassi mudeli argumenttunnuste D ning H väärtused või siis puude arv. Teisalt võib proovitükkide andmetes esineda väike biomassi ülehinnang, sest proovitükid ei paikne metsas täiesti juhuslikult, aga selle vea täpsem analüüs vajab eraldi uuringut.

Kogu Aegviidu katseala katvalt puistute biomassi seotud süsiniku kaardilt (joonis 4) tehti päringud metsaregistri kõikide eraldiste piiride järgi ja teisalt arvutati üldine metsade keskmine M_C metsakaardi järgi. Puistute keskmiseks M_C väärtuseks tuli metsaregistri metsamaa eraldistel 70 t C/ha (koos soodega 69 t C/ha) ja metsakaardi järgi kogu alal 69 t C/ha. Need hinnangud on üsna lähedased Eesti keskmistele.



Joonis 4. Aerolidari mõõtmisandmetele põhineva Aegviidu puistute biomassi seotud süsiniku kaardi väljavõte. Metsata valge ala on eristatud metsade kaardi (Peterson jt 2008) järgi.

Elektromagnetkiirguse spektri optilises osas tehtava kaugseire abil on võimalik saada infot metsa maapealse osa kohta. Käesolevas katses näidati, kuidas lidar-mõõtmiste tulemuste töötlemise ja kosmosepiltidelt tehtud metsade kaardi abil saab puistute biomassi seotud süsiniku hinnangud. Puistute maa-aluse osa hinnangu lisas analüüsi sisendis olev vastav allomeetriline mudel. Metoodika on rakendatav mistahes alal, kuid sarnaselt ALS-põhise tüvemahu hindamisega võib ka metsa biomassi kaardistamisel olla vajalik lähendada mudelitele lokaalsed parameetrid, sest okaspuumetsade jaoks sobiv mudel võib anda süstemaatilise veaga hinnanguid lehtpuumetsades (Arumäe ja Lang 2016). Mudelite kasutamisel tuleb arvestada ka ALS-mõõdistuste ajaga, sest raagus või osaliselt lehes puude korral on impulsi peegelduste kõrgusjaotus teistsugune võrreldes suvise skaneeringuga. Kaugseirel põhinevad biomassi hinnangud sõltuvad oluliselt ka algsest allomeetrilisest biomassi mudelist, millega puistu takseertunnuste põhjal arvutatakse puistu biomassi. Kõige täpsema mudeli saaks proovitükkidel, kus on tehtud destruktiivsel meetodil puude biomassi hindamise uuringuid, aga kahjuks on selliseid andmeid Eestis vähe või pole sama ala kohta biomassiuuringu tegemise ajaks ALS-andmeid.

Puuliikide vormiarvu ning puidu tiheduse erinevuste tõttu on allomeetrilised biomassimudelid tavaliselt liigiomased. Käesolevas näites kasutati esmalt takseerandmete põhjal biomassi arvutamiseks kirjandusest võetud Soome üksikpuude andmetel lähendatud kolme erineva puuliigi mudelit. Lidarandmetele aga raken-dati lõpuks puistute tasemel koostatud üldist mudelit, sest hõredatest ALS-punkti-parvedest üksikpuude eristamine ei ole võimalik (näiteid parvedest leiab Lang jt (2012) tööst) ja analüüsiks tuleb punktipilvedelt arvutada neid väljavõtteid statistiliselt kirjeldavad meetrikud. Metsa mõõtmiseks tavaliselt kasutatava proovitüki suurusel pikslil (siin 20 m) puistu enamuspuuliigi arvestamine annab mõningase täpsuse kasvu puistu tüvemahu hindamisel ALS-andmetelt (Lang jt 2012), kuid mudeli rakendamiseks on vaja kogu ala katvat puuliikide kaarti. Puistu liigilise koosseisu kaardi koostamist multispektraalsele satelliidipildile ja maapealsetele näidistele tuginedes on kirjeldanud Lang jt (2014). Nii saab metsa biomassi ja süsiniku kaardi koostada mistahes alale Eestis, sest vajalikud kaugseireandmed on olemas.

Tänuavaldused

Artikkel on seotud institutsionaalse uurimisteeduga IUT21-4 „Eesti metsade süsiniku dünaamika ja jätkusuutlik majandamine“.

Viidatud kirjandus

- Anniste, J., Viilup Ü. (2011). Metsa takseertunnuste määramisest laserskanneerimise abil. *Artiklid ja uurimused* 10, 38–53. Luua Metsanduskool.
- Arumäe, T., Lang, M. (2016). Aerolidarilt puistu tüvemahu hindamise mudelid ning võrdlus takseeritud tagavaraga. *Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused* 64, DOI:10.1515/fsmu-2016-0001.

- Cannell, M.G.R. (1984). Woody biomass of forest stands. *Forest Ecology and Management* 8, 299–313.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M.A., Chambers, J.Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J-P, Nelson, B.W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145, 87–99.
- Espenberg, S., Kuhi-Thalfeldt, R., Lahtvee, V., Jüssi, M., Moora, H., Laht, J., Mander, Ü., Salm, J., Parts, K. (2013). Eesti võimalused liikumaks konkurentsivõimelise madala süsinikuga majanduse suunas aastaks 2050. Säätva Eesti Instituut. Tallinn.
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. [Eggelston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (toim)]. Hayama: Institute of Global Environmental Strategies (IGES). Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use.
- IPCC. (2003). Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. [Penman J., Gytarsky M., Hiraishi T., Krug, T., Kruger D., Pipatti R., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., Wagner F. (toim)] IPCC/IGES, Hayama, Japan.
- Krigul, T. (1972). Metsatakseerimine. Tallinn, Valgus.
- Kõlli, R. (1988). Phytoproduction of Estonian forest soils. *Почвоведение* 4, 96–107.
- Kõlli, R., Asi, E., Köster, T. (2004). Organic carbon pools in Estonian forest soils. *Baltic Forestry* 10(1), 19–26.
- Lang, M. (2010). Estimation of crown and canopy cover from airborne lidar data. *Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused* 52, 5–17.
- Lang, M., Arumäe, T., Anniste, J. (2012). Estimation of main forest inventory variables from spectral and airborne lidar data in Aegviidu test site, Estonia. *Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused* 56, 27–41.
- Lang, M. (2013). A simple method for mapping woody plant cover in agricultural fields using airborne lidar. *Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused* 58, 5–11.
- Lang, M., Arumäe, T. (2014). Kaugseire praktilistes metsanduslikes rakendustes Eestis. [Aan, A., Narusk, K. (toim)]. Kaugseire Eestis 2014, 128–137. Tallinn: Keskkonnaagentuur.
- Lang, M., Arumäe, T., Lükk, T., Sims, A. (2014). Estimation of standing wood volume and species composition in managed nemoral multi-layer mixed forests by using nearest neighbour classifier, multispectral satellite images and airborne lidar data. *Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused* 61, 47–68.
- Levy, P.E., Hale, S.E., Nicoll, B.C. (2004). Biomass expansion factors and root:shoot ratios for coniferous tree species in Great Britain. *Forestry* 77, 421–430.
- McGaughey, R.J. (2014). FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and visualization. March 2014 – FUSION, Version 3.42. United States Department of Agriculture Forest Service Pacific Northwest Research Station.

- Marklund, L.G. (1988). Biomass functions for pine, spruce and birch in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Survey. Report 45, 71 lk.
- Mets. (2016). Aastaraamat Mets 2014. Keskkonnaagentuur. Tallinn.
- Metsaressursi arvestuse riikliku registri põhimäärus. Riigi Teataja, RT I, 12.01.2016, 2.
- Nilson, T., Peterson, U. (1994). Age dependence of forest reflectance – analysis of main driving factors. *Remote Sensing of Environment* 48, 319–331.
- Pajtík, J., Konôpka, B., Lukac, M. (2011). Individual biomass fractors for beech, oak and pine in Slovakia: a comparative study in young naturally regenerated stands. *Trees* 25, 277–288.
- Peterson, U., Liira, J., Püssa, K. (2008). Metsaga alade ning lageraiete ja nendega sarnaste häiringute kaugseire. [Väljataga, K., Kaukver, K. (toim).] Kaugseire Eestis. Tartu Observatoorium, Keskkonnaministeeriumi Info- ja Tehnokeskus, Tallinn, 48–68.
- Repola, J. (2008). Biomass equations for birch in Finland. *Silva Fennica* 42, 605–624.
- Repola, J. (2009). Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. *Silva Fennica* 43, 625–647.
- Tappo, E. (1982). Eesti NSV puistute keskmised takseertunnused puistu enamuspuuliigi, boniteedi ja vanuse järgi. Eesti NSV Põllumajandusministeeriumi Informatsiooni ja Juurutamise Valitsus, Tallinn. 72 lk.
- Varik, M. (2014). Carbon fluxes and storages in a chronosequence of silver birch stands. PhD thesis. Eesti Maaülikool.

Airborne LIDAR-based estimation of forest stand biomass: A case study in Aegviidu

Summary

Aegviidu test site was established in 2008 for development of remote sensing forest inventory methods (Anniste and Viilup 2011, Lang et al. 2012). We estimated woody biomass (above- and below-ground) with allometric regression models (Repola 2008, 2009) 1) for forest stands using data from State Register for Accounting of Forest Resource, and 2) for 410 sample plots where trees were calipered. A linear model (1) was then estimated on sample plot data to convert LIDAR metrics-based wood volume to total woody biomass (Figures 2 and 3). The model was applied to 20 m raster of LIDAR-based wood volume estimates V_{ALS} obtained with the model from Arumäe and Lang (2016) to construct carbon M_C map of forest stands (Figure 4) for Aegviidu test site. The mean M_C ranged between 69...70 t/ha of C depending on forest map the query was based on. For comparison, National Forest Inventory based mean estimate for all Estonian forests is $M_C=72.4$ t/ha of C.

Aerolaserskaneerimise (ALS) andmestiku kasutamise võimalustest Lahemaa ja Karula rahvusparki kultuurmaastike uurimisel

Mats Meriste¹, Kalev Sepp², Pille Tomson², Ants Vain³

1 Tartu Ülikool, ökoloogia ja maateaduse instituut, Ravila 14A, 50411 Tartu

2 Eesti Maaülikool, põllumajandus- ja keskkonnainstituut, Kreutzwaldi 5, 51014 Tartu

3 Maa-amet, geoinfosüsteemide büroo, Mustamäe tee 51, 10621 Tallinn

Kokkuvõte

Käesolevas uurimistöös katsetati ALSi andmete rakendatavust varase maa-kasutuse jälgede kaardistamiseks Lahemaa ja Karula rahvusparkis. ALSi andmetest katsetati nii kogu Eestit katvat tavalennu andmestikku (lennukõrgus 2400 m) kui ka käesoleva uurimistöö jaoks tellitud madallennu andmestikku (lennukõrgus 1250 m) Lahemaa rahvusparki kohta. ALSi andmetest loodi digitaalsed kõrgusmudelid, nende alusel omakorda peenreljeefimudelid. Mudeleid erinevalt esitades ja töödeldes (reljeefi varjutusmudel, nõlvagradiendi mudel, värvimudel ja kontrastne värvimudel) interpreteeriti mudelitel visuaalselt avalduvat inimtekkelist peenreljeefi. Analüüsiti objekte, mis viitavad ajaloolise maakasutuse jälgedele reljeefis (kraavid, põllupeenrad, kiviaiad, kalmed, kaeved, kivihunnikud, künnimustrid, kivihunnikute väljad, muud korrapärased ilmingud maastikus). Madallennu andmestik osutus hästi kasutatavaks avamaastikul asuvate varase põllumajanduse pinnavormide kirjeldamiseks. Suuremad reljeefivormid (kivihunnikud/kalmed) tulid mudelil hästi esile nii lagedal maal kui ka metsas. Tavalennu andmestik annab hea ülevaate lagedate alade reljeefist. Metsasel alal varjutas pinnavorme puurindest tulenev müra.

Võtmesõnad: laserskaneerimine, pärandmaastikud, Lahemaa, Karula

Sissejuhatus

Pärandmaastike lahutamatuks osaks on inimtegevuse jäljed, mis peegeldavad territooriumi kujunemist. Sellisteks jälgedeks võivad olla eri ajaperioodide põlluharimisest tulenevad muutused reljeefis (põllupeenrad, künnimustrid, künniterrassid, kivihunnikud jne), kraavitused, rajad ja teed, kääpad, varemed, vundamendid, kiviaiad, linalootustiigid jne). Need reljeefivormid kannavad olulist infot varasemast maakasutusest ja maastike kujunemisest, kuid on raskesti kaardistatavad, kuna on reeglina madalad ja paiknevad maastikul väga hajutatult. ALSi (*airborne laser scanner*) andmed võimaldavad analüüsida ka reljeefi väikevorme suurel maa-alal ning minimeerida sealjuures taimestiku varjava mõju.

Pärandmaastike kujunemist ja nende omadusi on Eestis laialdaselt uuritud, tuginedes erinevatele meetoditele (vt Palang jt, 1998; Raet jt, 2008; Lang jt, 2010; Poska jt, 2014; Tomson jt, 2015). Viimastel aastatel on mitmetes teadusvaldkondades hakatud katsetama ALSi kasutamise võimalusi (vt Gruno jt, 2013; Grünthal jt, 2013; Eesalu jt, 2014; Grünthal jt, 2014).

Käesoleva töö eesmärgiks on testida topograafilise lidari (aerolaserskanneri ehk ALSi) andmestiku rakendatavust ajaloolise maakasutuse jälgede kaardistamisel. Terminiga „ajalooline maakasutus“ tähistame siin põllumajanduslikku maakasutust alates muinasajast kuni 20. sajandi keskpaigani, s.o nõukogude aja mehhaniseerimiseni.

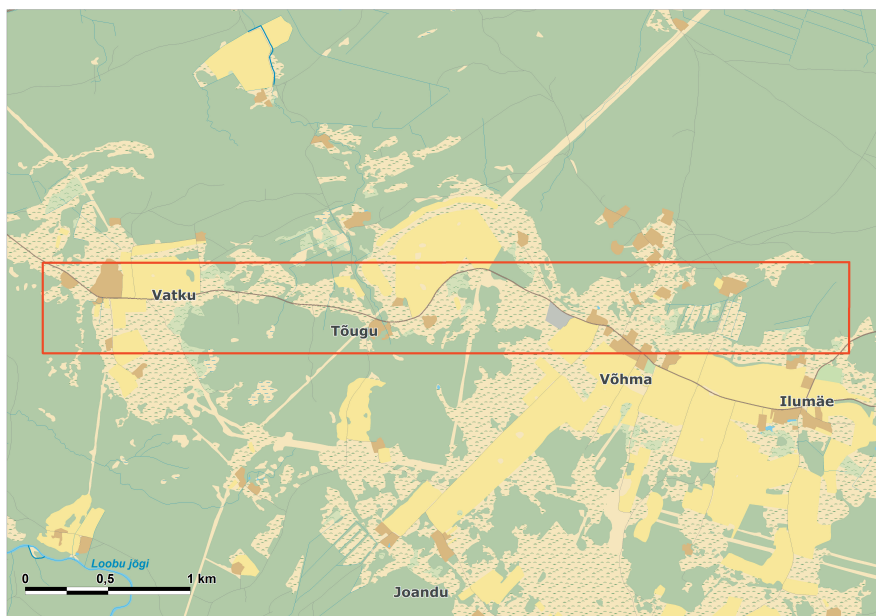
1. Uurimisalad

Töö uurimisaladeks valiti Lahemaa rahvuspark Põhja-Eestis ja Karula rahvuspark Lõuna-Eestis. Mõlema rahvusparki oluliseks kaitseväärtuseks on kaitseeeskirjas määratletud pärandmaastikud ning nendel aladel on hästi esindatud mitmekesised maakatte tüübid ja maakasutusviisid. Kuna ALSi andmestik on reeglina väga suure mahuga ning vajab suuri arvutusvõimsusi, siis eraldati proovialadel väiksemad polügoonid, kus oli hõlpsam meetodeid katsetada ja teha vajadusel tulemuste kontrollimiseks välitöid.

1.1. Lahemaa prooviala

Lahemaa rahvuspark valiti proovialaks sellepärast, et sealsetel loopealsetel on hästi säilinud ja kaardistatud varase maakasutuse mustrid (muinaspõllud, põllupeenrad, kalmed) (Lang, 2010; Lang jt, 2010). Lisaks on Lahemaa maastike kohta viimasel ajal tehtud arvukalt uuringuid (Lang jt, 2010).

Arvestades Maa-ameti geoportaali kultuurimälestiste andmekihti kantud mälestiste paiknemist, valiti välja *ca* 5×0,5 km prooviala Vatku-Tõugu-Võhma piirkonnas (joonis 1). Piirkonnale telliti Maa-ametilt lisaks ka madallend täiendavate lidariandmete kogumiseks. Proovialale jääb nii loopealseid, nüüdisaegseid põlde kui



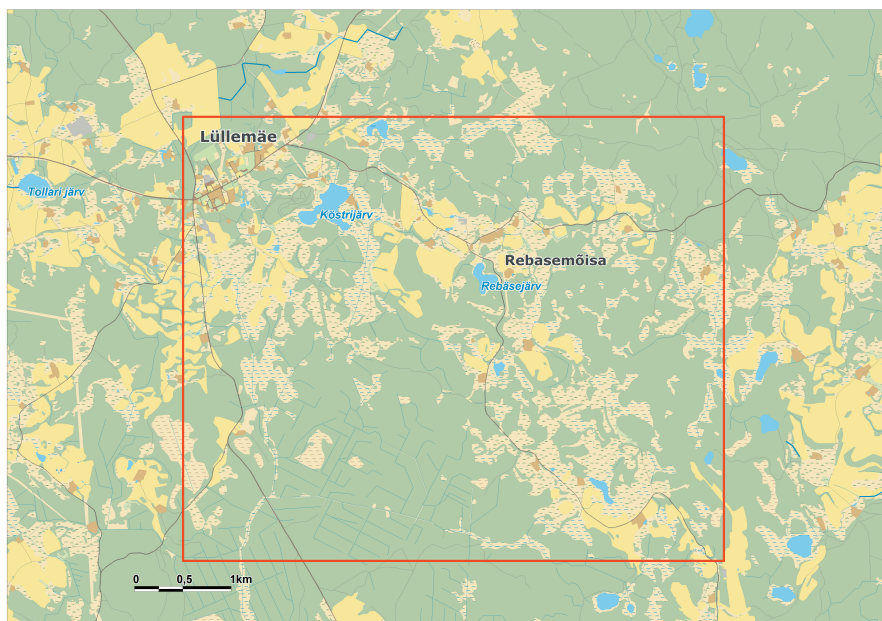
Joonis 1. Lahemaa prooviala.

ka metsastunud alasid. Looduslikest reljeefvormidest jäävad uuringualale mattunud pangaastang ja Tõnu oja org. Proovialaks valiti Eesti üks arheoloogiliselt uuritumaid piirkondi. Alal on tuvastatud rohkesti kalmeid, asulakohti ning fossiilsete põldude jäänused (Lang jt, 2010). Lahemaa prooviala kohta tehti ALSi andmete põhjal kaks analüüsi, üks tavalennu, teine madallennu andmete alusel.

1.2. Karula prooviala

Karula rahvuspark esindab suure metsasusega Kagu-Eesti kuppelmaastikku. Karula iseloomulikud karakteristikud – keeruline reljeef, suur metsasus (samas on nüüdisaegsed metsad sageli kasvanud varasematele põllumaadele) ning lagedate alade suur kultuuristatus – andsid võimaluse proovida ALSi andmestiku kasutamist oluliselt teistsugustes tingimustes võrreldes Lahemaa rahvusparkiga. Kuna Karula rahvusparki ei tellitud tihedama andmestikuga madallendu, siis võimaldas andmemaht teha analüüse suuremate alade kohta. Karula uuringuala asend on esitatud joonisel 2. Prooviala valiti Rebasemõisa-Karkküla ümbruses, arvestades piirkonna pikaajalist maakasutust (Tomson, 2007) ja suhteliselt head avatust ka tänapäeval. Proovialal asuvad üldise metsasuse foonil lagedamad suurmõhnad. Piirkonda jääb Lüllemäe asulakoht (u 500 a eKr), kivikalme Karkkülas (I aastatuhande I pool), Rebase linnamägi (u 700–1050 pKr) ning hilisemaid asustuse märke. Proovialast kõigest 22,5% on lagedad mineraalmaad, ülejäänud ala on kaetud metsa või madal-soodega.

Proovialade 19. sajandi maakasutuse struktuur tehti kindlaks 19. sajandi mõisa- ja talukaartide abil. Maakasutusega seotud objektide olemasolu ja iseloomu kontrolliti välitöödel 2013. aasta suvel.



Joonis 2. Karula prooviala.

2. Algandmed ja metoodika

2.1. Andmed

Töös kasutati Maa-ameti ALS-mõõtmiste kõrgusandmeid 2012. (Karula rahvuspark) ja 2013. aastast (Lahemaa rahvuspark). ALS-mõõtmised on tehtud Maa-ameti ALS50-II skanneriga 2400 m kõrguselt, keskmine punktitiheus on kuni 0,45 punkti ruutmeetrile (www.maaamet.ee). Sellised standardsed mõõtmisandmed (edaspidi tavalennu ALSi andmed) on saadaval kogu Eesti jaoks ja seega analoogsete analüüside jaoks kasutatavad kõikjal üle Eesti.

Lisaks tavalennu ALSi andmetele telliti käesoleva uurimistöö tarbeks Maa-ametilt madalam lend, et analüüsida tihedama ALSi andmestiku kasutatavust pärandmaastike uuringutes (edaspidi madallend). Tellitud mõõtmine tehti samade seadmetega kui tavalennul, kuid lennukõrgus oli 1250 m, vertikaalne täpsus 0,07 m, punkti-tihedus vähemalt 1,0 punkti ruutmeetrile. Mõõdetud andmed väljastas Maa-amet las-formaadis.

2.2. Andmetöötlus

Algandmed ja filtreerimine

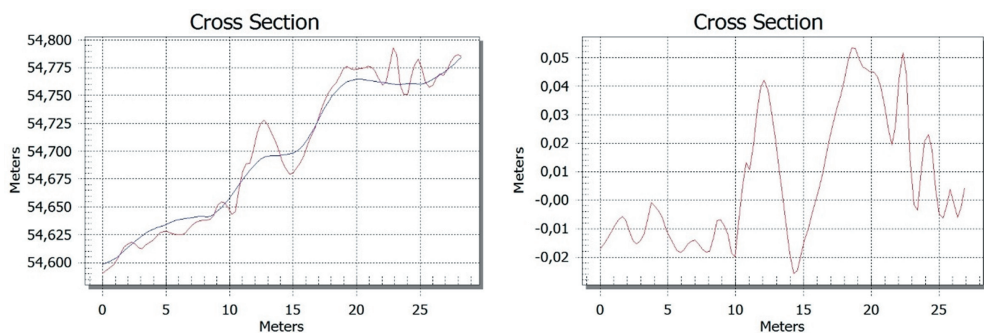
Maa-ameti väljastatud *.las*-failid sisaldavad andmeid kõikide peegelduste kohta, sh peegeldused taimestikult, hoonetelt jne. Filtreerimaks algandmestikust välja vaid reljeefi kirjeldavad kirjed, kasutati vabavaralist lidariandmete töötlemise tarkvara LAStools <http://lastools.org> programmi *lasground*. Sama programmi liideti vajadusel väiksemad andmehulgad kokku ning konverteeriti andmestik ASCII-vormingusse, mida suudab „mõista“ enamik andmetöötlustarkvara.

Digitaalse kõrgusmodeli (DEM) loomine

Kuna ajaloolise maakasutuse märkide uurimine tähendab peamiselt visuaalset interpretatsiooni, siis on tulemusliku tõlgendamise eelduseks maapinna (mikro)reljeefi võimalikult selge esitus interpreteerijale. Maapinda kirjeldavate punktiandmete (geograafilised koordinaadid, kõrgus) muutmisel digitaalseks kõrgusmodeliks kasutati programmi MapInfo Professional 10.5. Kõrgusmodeli loomisel lähtuti eesmärgist saavutada maksimaalne lahutusvõime, et reljeefi väikevorme võimalikult hästi esitada.

Peenreljeefimodeli (*local relief model*, LRM) loomine

Uuringus käsitletud reljeefivormid olid reeglina madalad (suhtelised kõrgused alla 20 cm) ning nad jäävad üldise reljeefi taustal tihti varju. Selleks, et esile tuua uuritava skaala pinnavorme, filtreeritakse digitaalsest reljeefimodelist välja suuremad reljeefi-vormid ning säilitatakse vaid reljeef selles skaalas, mida hetkel vaadeldakse. Selliselt töödeldud digitaalset pinnamudelit nimetatakse peenreljeefimodeliks (LRM). LRMi saamiseks luuakse kaks reljeefimudelit: üks detailsem, mis sisaldab kogu reljeefi andmestikku uuritava detailsuseni, ja teine selliste parameetritega, mis kirjeldavad vaid reljeefi suurvorme skaalal, mis uurijat antud töös ei huvita. Lahutades detailsest mudelist üldisema, saame mudeli, mis kirjeldab reljeefi vaid uuritavas mõõtkavas (joonis 3).



Joonis 3. LRMI loomine digitaalsest kõrgusmudelist. Vasakul lähtemudelite profiilid, paremal saadud andmetest arvutatud LRM.

LRMi visualiseerimine

Saadud peenreljeefimudel kirjeldab hästi reljeefivorme uuritavas mõõtkavas, kuid sisaldab lisaks ka palju pinnamoe tõlgendamist segavat müra. Kuna kõrgusmudelilt maakasutuse mustrite uurimine põhineb peamiselt visuaalsel interpretatsioonil, siis ongi uurimistöö raskuspunkt koondunud mudelite erinevatele töötlustele ja esitustele, mis võimaldaksid minimeerida müra ja objekti vaadeldavaid omadusi maksimaalselt esile tõsta. Mitmed uurijad on selliste tehniliste küsimustega põhjalikult tegelenud ja esitanud oma meetodid (vt Hesse, 2010; Štular jt, 2012). Kuna paljud pakutud meetoditest vajavad spetsiaalset tarkvara ning annavad vähe olulist täiendavat infot, siis nimetatakse siin peamised ja enim kasutatavad võtted mikroreljeefi esitamiseks ja filtreerimiseks.

Reljeefi varjutamine

Üks levinumaid reljeefimudeli esitusvorme on varjutatud reljeefimudel. Varjutamine toob välja muutused reljeefis ja võimaldab seetõttu reljeefivorme paremini esile tõsta. Varjutatud reljeefimudeli interpreteerimisel tuleb kindlasti arvestada „valguse“ suuna mõju esiletõstatavatele objektidele. Varjutus tõstab kontrastselt esile objektid, mis on „valguse“ suunaga risti, piki valgustatuse suunda asetsevad objektid ei pruugi olla võrdselt esile tõstetud. Varjutusmudeli puhul on oluline kasutada DEMi asemel LRMI, kuna reljeefi suuremate muutuste varjud varjutavad täielikult nõlval asetseva mikroreljeefi. Kasutades eri suundades arvutatud varjutuse pilte, võib neile rakendada peakomponentide analüüsi, mis võimaldab eri suundadest tehtud varjutuste peamised erinevused kokku koondada.

Nõlvagradiendi mudel

See on reljeefimudeli esitusvorm, mille puhul ei esitata mitte reljeefi kõrgusi, vaid kallakuse väärtusi. Selline mudeli esitusvorm toob esile alad, kus reljeefi kallakus kõige enam muutub.

Erinevad reljeefimudeli värvilahendused

Kuna interpreteerimisel kasutatakse peamiselt interpreteerija taju ja kogemusi, siis võib olulisi reljeefivorme esitada erinevate värvilahendustena. Toomaks esile reljeefi positiivsete ja negatiivsete vormide vaheldumist (LRMi puhul pinnanormaali suhtes, vt joonis 3), esitatakse pind kontrastse kahevärvimudelina, kus negatiivsed väärtused esitatakse ühe värviga ja positiivsed teisega. Kasutatakse ka mitmevärvilisi sujuvate üleminekutega esitusvorme, kus värvide kontrastid seatakse maksimaalselt esile tooma enim huvitavat väärtuste vahemikku. Enamasti kasutatakse värvilahendusi koos varjutusega.

3. Tulemused ja arutelu

3.1. Lahemaa prooviala

3.1.1. Kõrgusmodel ja LRM

Lahemaa proovialal tehti mõlemast andmehulgast (madallend ja tavalend) kõrgusmodelid ja peenreljeefimudelid, saadud mudeleid analüüsiti ja kasutati analoogseid esitusviise võrdlemaks kasutatava info hulka, mida neist saada oli. Mudelite aluseks olevate andmehulkade maapinda kirjeldavate kirjete tihedused eri maakasutustüüpides on esitatud tabelis 1. Oluline on siiski märkida, et puudega kaetud aladel (võsastunud niiduala, mets) ei jagune mõõtepunktid mitte ühtlaselt, vaid tihedama punktiala sees võib olla hõredamaid alasid, esineb ka alasid, mille kohta andmed puuduvad.

Tabel 1. Lahemaa prooviala tavalennu ja madallennu algandmete võrdlus.

Maakatte tüüp/ mõõtmisviis	Niit punkte m ²	Põld punkte m ²	Mets punkte m ²
tavalend	0,35	0,35	0,14
madallend	3,82	4,53	2,22

Andmete ebaühtlasest jaotusest tulenevalt jäävad mudeleile sisse augud, või siis alad, mis on servapunktide väärtuste abil kokku interpreteeritud, kuid erinevad andmetäpsuse poolest oluliselt ülejäänud mudelist. Siiski on visuaalsel interpretatsioonil kergem aduda „aukudeta“ pinda, ignoreerides andmeteta alade pindasid. Interpreteeritava pinna raku (piksli) suurus võiks olla väiksem kui vähim mõõdetud punktide vahe, tagamaks peenreljeefist maksimaalselt teravat pilti. Kuna eesmärgiks oli kirjeldada vaid alal esinevaid reljeefivorme suhtelise kõrgusega 0,05 – 0,5 m, siis arvutati aladest ka peenreljeefimudel.

3.1.2. Erinevad esitusvormid ja interpretatsioon

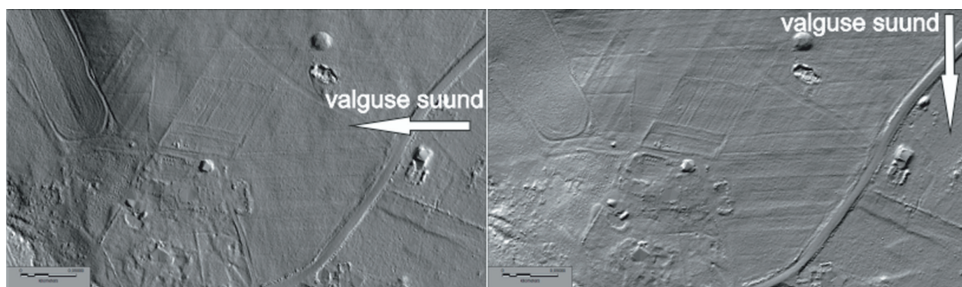
Toomaks välja loodud LRMmudeli erinevaid esitusvorme ja nende interpreteerimisel saadavat infot loodi neli kõige enam kasutatavat ja ka enim infot sisaldavat mudelit: reljeefi varjutusmodel, nõlvagradiendi mudel, värvimudel ja kontrastne värvimudel.

Ajaloolise maakasutuse jälgedele viitavad objektid reljeefis on: a) joonelised elemendid (kraavid, teed/rajad, põllupeenrad, kiviaiad jne); b) järsunõlvalised hunnikud/lohud (kalmed, kaeved, kiviunnikud, vanad vundamendid jne); c) rohkem või vähem korrapärased mustrid (kännimustrid, kiviunnikute väljad, muud korrapärased ilmingud maastikus). Interpreteerija peab eristama nüüdisaegseid elemente ajaloolistest: vastavalt konkreetsele lähteülesandele tuleb eristada olulisi elemente (antud juhul ajaloolise maakasutuse mustrid ja elemendid) mitteolulistest elementidest (nüüdisaegsed teed ja kraavid, nüüdisaegne kannimuster jne). Sellistes eristustes peab interpreteerija toetuma oma kogemustele. Palju aitab ka võrdlus põhikaardi ja varasemate kaardistuste andmetega. Paljud maastikuelemendid on kaardimaterjali põhjal eristamatud ja vajavad määratlemiseks välitööd. Samas on osa mikrovorme oma madaluse tõttu looduses eristamatud ning neid on võimalik tuvastada üksnes mudelite abil.

3.1.3. Erinevad esitusmudelid

Reljeefi varjutusmudel

Reljeefi varjutusmudel annab edasi olulise osa kogu reljeefi mustrist. Pinnamoe loetavus sõltub suuresti sellest, millisest suunast on mudelile arvutatud „valgustatus“ (joonis 4). Saamaks paremat ülevaadet mikroreljeefist on võimalik arvutada „valgustatus“ 4–16 eri suunast, tihendamaks saadud suurt andmestikku võib arvutada erinevalt varjutatud mudelite peakomponendid (PCA), mis toob esile varjutuspiltide olulisimad sarnasused ja erisused. Varjutuspildi puuduseks on info esitamine ühtlaselt halltoonides, mis teeb selle lugemise keeruliseks. Tõstes pildi kontrastust, tuuakse objektid selgemini esile, kuid suureneb ka mudelis esinev müra (eriti metsase maastiku puhul).

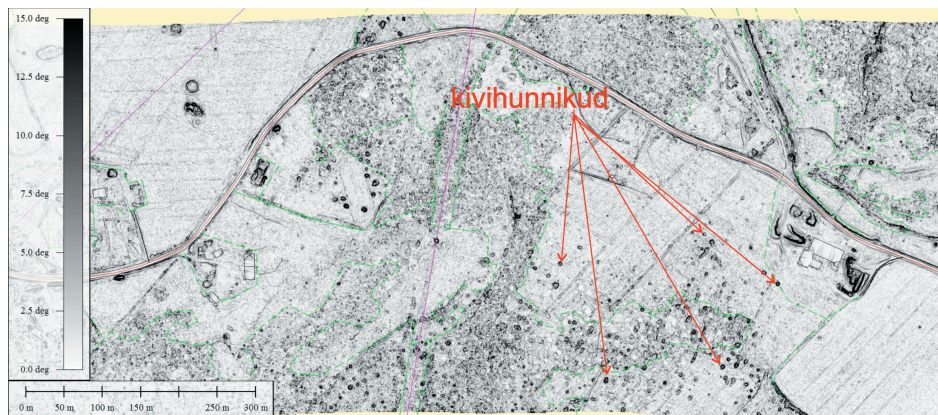


Joonis 4. Valgustatuse suuna mõju reljeefiinfo esitamisel. Madallennu DEM 2013, Tõugu küla põllud.

Nõlvagradiendi mudel

Nõlvagradiendi mudel toob väga hästi esile alad, kus reljeefi kallakus muutub järsult. Sageli on sellised järsud muutused iseloomulikud just inimtekkelistele pinnavormidele. Nõlvakallakuse mudelis on vähem müra ja ümbritsevast nõlvagradiendi poolest oluliselt eristuvad objektid (vaatamata nende väikesele suhtelisele kõrgusele) joonistuvad väga selgelt välja. Gradiendimudelil tulevad väga hästi esile

tasasel maal asetsevad kivihiunnikud (ka väga madalad), kaevatud lohud ja augud, kraavid ja kiviaiad ning teed. Vähem tulevad esile madalad mustrid, kuna künnijäljed on reeglina liiga lauged (v.a nüüdisaegsed kokku- ja lahkukünnid, mis on tänu järskudele muutustele selgemalt näha) (joonis 5).



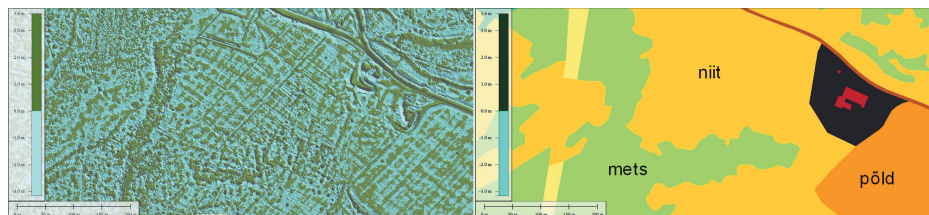
Joonis 5. Nõlvagradiendi mudel, Tõugu küla. Madallennu andmed 2013. Põllu künnimustrid on aimatavad, kuid ebaselged, see-eest madalad (suhteline kõrgus ca 0,5 m) kivihiunnikud ja põllupeenrad on selgesti eristatavad.

Värvimudel

Mikroreljeefi esitamine eri värvidega võimaldab esile tõsta lisaks muutustele ka (mikro)reljeefi erinevaid suhtelisi kõrguste vahemikke. Koos varjutusega võib selline mudel olla väga informatiivne ja lihtsaim viis kõrgusmudelit interpreteerida. Liiga paljude värvide lisamine võib teha pildi kirjuks ja raskesti tajutavaks.

Kontrastne värvimudel

Värvimudel luuakse kahe või enama värviga, kusjuures värvide üleminekud ei ole sujuvad, vaid teravad. Selliselt mudelilt on hästi eristatavad mikroreljeefi põhijooned, kuid info vormide suhtelise kõrguse ja kuju kohta on vähene. Sobib kõige paremini esmaseks vaatluseks, kuna mustrid ja objektid on kõige kergemini eristatavad, müra esineb vähem. Õigesti asetatud kontrastpunkt toob maastiku mustrid väga selgelt esile (joonis 6).



Joonis 6. Kontrastvärviga LRMi esitus ja sama ala põhikaardil. Selgesti eristuvad künnimustrid nii nüüdisaegsel põllul kui ka muinaspõllul (praegusel niidul/metsas). Madallennu LRM, Võhma küla.

3.1.4. Tavalennu ja madallennu mõõtmiste andmestik

Üks käesoleva uurimistöö eesmärgke oli selgitada, millist infot ajaloolise maa-kasutuse jälgede kohta on võimalik kaardistada ASL-mudelite abil nii tavalennu kui ka madallennu puhul.

Tavalennu andmestik on üle 10 korra hõredam kui madallennu andmestik. See avaldub selgelt ka saadud info kvaliteedis. Kui üldiselt annab tavalend reljeefist piisava täpsusega ülevaate, siis vaadeldavas skaalas väikereljeefi andmestik on üsna puudulik punktide liiga hõreda asetuse tõttu (nt niidualadel 0,35 punkti ruutmeetril), mistõttu väiksemad reljeefivormid ei saa mudelil kajastatud (üks punkt ei kirjelda piisavalt 2 m läbimõõduga põllukivihunnikut).

Madallennu andmetega tehtud kontrastne kahevärvimudel esitab maaharimise mustreid. Mudel võimaldab eristada nüüdisaegset põldu varasema perioodi põllust. Peale selle on vana põllumuster liigendatud kiviaedade ja hunnikutega. Metsastel aladel ei anna kumbki mõõtmisviisi sõltumata mudeli esitusviisist peenreljeefi kohta palju infot – peamiselt seetõttu, et metsaaluse maapinna defineerimine toob kaasa palju müra (mättad, kännud) ning niigi vähese info varjutab puurinne. Siiski võimaldab madallennu andmestik kohati leida pärandmaastike elemente ka hõredama metsa alt (joonis 5). Reljeefis paremini välja joonistuvad reljeefivormid, nagu vanad teed, kiviaiad ja kraavid, on aimatavad ka metsastunud aladel.

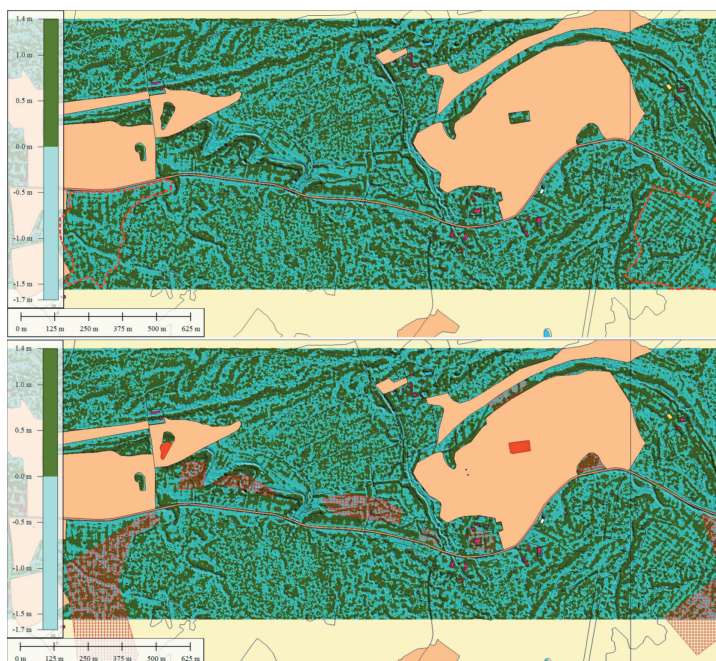
3.1.5. Ajaloolise maakasutuse märgid

Lahemaa proovialalt on varasemate arheoloogiliste uuringute põhjal leitud tarand- ja kivikirstkalmeid, muinaspõlde, ribapõlde, künnilahkusi, põllukivihunnikuid, lapipõlde ja asulakohti. Käesolevas uurimuses keskenduti ajaloolise põllumajanduse jälgede (põllumustrid, kivihunnikud) ja kalmete otsingutele reljeefimudelilt.

3.1.5.1. Põlluharimise mustrid

Tuvastamaks varase põllumajanduse jälgi reljeefis otsiti loodud reljeefimudelilt ja nende tuletistelt põllumajandusega seostatavaid mustreid, nagu künnijäljed ja muud madalad (suhteline kõrgus alla 0,3 m) korrapärased mustrid või lineaarsed moodustised maastikus. Leitud mustrid kontrolliti tänapäevase põhikaardi ja ortofotode alusel, kõrvaldamaks nüüdisaegseid struktuure. Välitööde ja varasemate arheoloogiliste uuringute põhjal tutvuti piirkonnale iseloomulike varaste põlluharimise jälgedega.

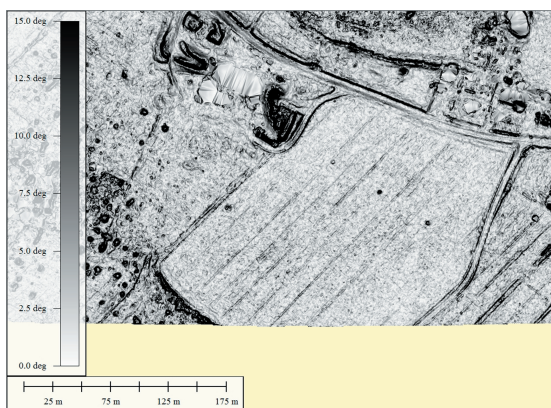
Nagu varem märgitud, võib tavalennu andmetel põhinevalt mudelilt leida põlluharimisele viitavaid mustreid. Kui eraldada mudelil saadud mustritega aladest need, mis ei kattu nüüdisaegsete põldudega (põhikaardilt) või hiliste ajalooliste põldudega (ajaloolised kaardid), saame teada, millised alad vajaksid edasisi uuringuid (joonis 7). Näiteks leiti mudeli abil põllukivihunnikuid ka hõreda metsa alt väljastpoolt kaitse alla võetud muinaspõlluala.



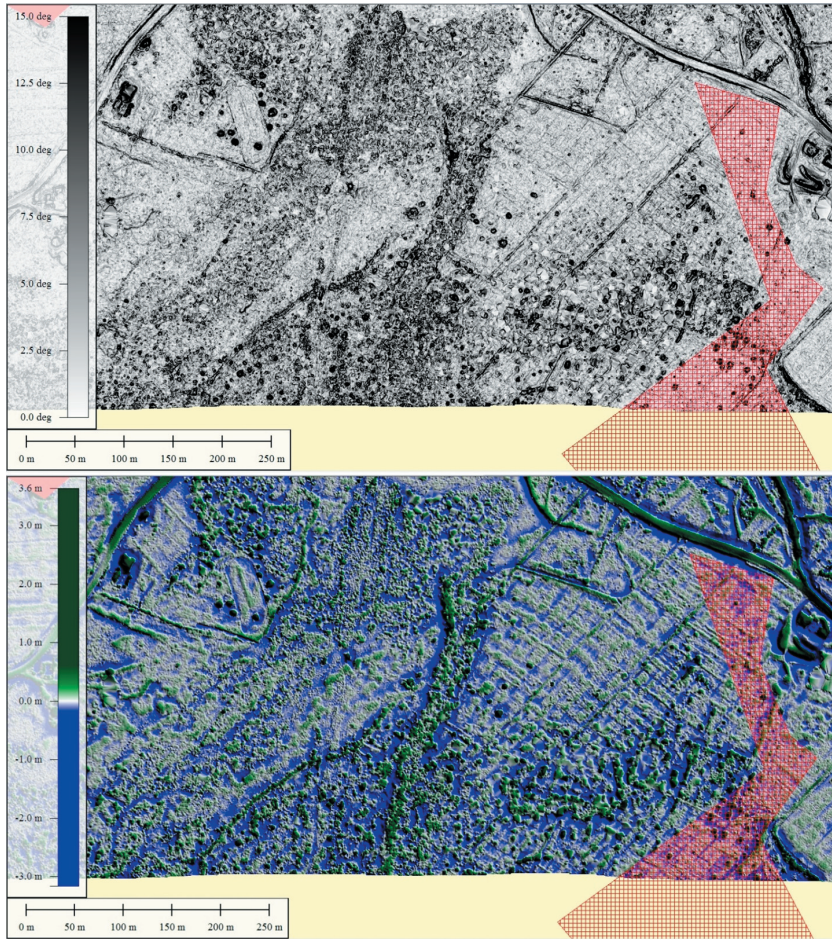
Joonis 7. Tavalennu LRMI interpretatsioon, kasutades kontrastset kahevärviesitust. Üleval mudel, kaetud on põhikaardi põllualad. Punase punktiiriga on märgitud alad, kus on näha põlluharimise mustreid reljeefis väljaspool praegusi põlde. All sama kaart koos varem inventeeritud muinaspõldudega (ruudustatud alad). Alade kattuvus on olemas ning välitööd kinnitasid põldude võimalikku laiemat esinemist võrreldes varasemate uuringutega. Teest põhja pool paiknevad väiksemad muinaspõllualad on ilmselt valesti digiteeritud, kuna lõikavad kohati pangaastangut.

Madallennu andmestik esitab kohalikest maaharimismustritest oluliselt parema ülevaate. Peaaegu kõigil lagedamatel aladel on jälgi varasematest kündmistest. Kuna madallennu LRM annab reljeefimustritest selgema ja kontrastsema pildi, saab mudeli järgi teha esmaseid oletusi põllumustrite kohta, hinnates ka nende vanust (joonis 8).

Joonis 8. Nüüdisaegne põld madallennu peenreljeefimudelil. Künd on pikk ja ühtlane, põllupind on puhas. Muster on tekkinud kokku- ja lahkukünni vaheldumisest.



Muinaspõllu reljeefipilti iseloomustab sageli pisikeste kivihiunnikute esine-
mine ning väga kitsaste ja suhteliselt lühikeste põllusiilude sage vaheldumine
(joonis 9). Kuna muinaspõllud on praegu enamasti võsastuvad loopealsed või kasu-
tusel karjamaadena, ei ole põllu pind "puhas", vaid sisaldab rohkesti müra.



Joonis 9. Ülemiselt gradiendipildilt on selgelt näha ulatuslik põllukivihiunnikute esinemisala ka väljaspool juba kaardistatud muinaspõlde. Selline ala paistab jätkuvalt kogu kaardipildi lõunaosa ulatuses. Välja lääneosas tehtud välitööd kinnitasid põllukivihiunnikute esinemist. Huvitav on ala loodenurgas paiknev ümmargune põld, mis meenutab nüüdisaegset põldu, samas on kivihiunnikud jäänud muutumatult alles, üks asetseb ka põlluala sees. Joonise alumine osa näitab põllule iseloomulikku mustrit. Põld on jagatud kitsasteks paarikümne meetri laiusteks ribadeks, struktuurid ristuvad omavahel ja moodustavad ruudulaadseid mustreid.

Kalmete kaardistamine tavalennu andmete põhjal palju infot ei anna, kuna kalmete mõõdud on liiga väikesed. Siiski joonistuvad Tõugu kalmevälja suuremad kalmed ka tavalennukõrgusandmetest ilust välja. Samas on nii suured vormid ka muude meetoditega kergesti kaardistatavad ja LRM ei anna uut infot juurde.

Madallennu andmetest tulevad igasugused kuhjatised selgesti esile ja on hästi vaadeldavad nõlvagradiendi mudelil. Samas ei ole võimalik vahet teha kivi-hunnikutel ja kalmetel, juurdeleitud kuhilad tuleb klassifitseerida välitööde käigus. Puude all ja metsastunud aladel võivad paljud mudelil esinevad kuhjatised osutuda mõõtmis- või arvutusvigadeks.

3.2. Karula prooviala

Karula ala kohta oli kasutada vaid tavalennu andmestik, mille punktisageduse parameetrid on esitatud tabelis 2. Tulenevalt keerulisest maastikust on Karula alal info- tihedus madal ja seetõttu kirjeldab andmestik ka maakasutuse mustreid halvasti.

Tabel 2. ALS-mõõtmise punktiparve maapinda kirjeldavate punktide sagedus Karula proovialal.

Maakatte tüüp/ Mõõtmisviis	Niit punkte m ²	Põld punkte m ²	Mets punkte m ²
tavalend	0,12	0,15	0,02

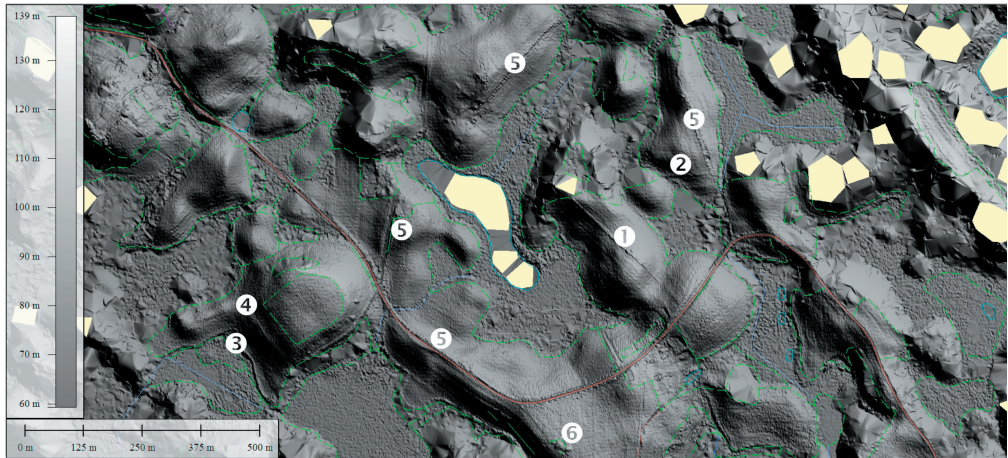
Karula maastikus on varasemad põlluharimise jäljed enamasti künniperved, mis on pikaajalise põlluharimise tagajärjel kuhjunud küngaste alumisse serva. Kohati esineb ka ülemisi erosioonilisi terrasse, mis on tekkinud nõlva järsema osa alla aladel, kus künd on alanud poolest nõlvast. Senini lagedad põllud on püsinud avatuna enamasti tänu jätkuvale maakasutusele ning nüüdisaegne maaharimine on varjanud varasemad maakasutusjäljed.

Huvi pakusid ajaloolise maakasutuse jäljed metsastunud aladel, kus nad on nüüdisaegse maaharimise poolt muutmata, kuid seal jäävad nad puurinde tihe- duse tõttu tavalennul identifitseerimatuks. Mudeli hõre algandmestik ei võimalda Karula maaharimismustreid klassifitseerida, hästi eristatavad on künnijäljed viimase 50 aasta kündidest. Madalamatel aladel (paljud endised niidualad) on alanud soos- tumisprotsessid ja paljud alad on kibraste tegevuse tõttu üle ujutatud, mistõttu (ning väga hõreda andmestiku pärast) ei ole jälgitav ka varasem kraavituste süsteem.

Ammuste puutumata põlluharimisjälgedega maastike esinemine Karulas leidis tõestust 2014. aasta suvel tehtud välitööde ajal. Välitööde käigus leiti mitmeid pika- ajalise maaharimise tagajärjel tekkinud põlluterrasse, mis olid nüüdisaegsest põllu- majandusest puutumata. Kaevetest dateeritud sõeproovid viitasid terrasside kaju- nemise algusajaks 10.–11. sajandit. Paraku on sellised terrassid säilinud vaid metsa all ja punktitihe- dus 0,02 punkti ruutmeetri- le ei võimalda nende asendit tuvastada.

Huvitavate pinnavormidena tulevad Karula proovialal välja sirged vallid, mis poolitavad mitmeid põllumassiive. Need sirged vallid suhtelise kõrgusega kuni 0,5 m ei järgi ühtegi kaasaegset piiri ega ka põlluharimistavasid (ei sõltu reljeefist, pinnase omadustest jne). Võrdlus 19. sajandi maakasutuskartidega näitab, et sellised vallid on kujunenud lapiviisilise maakasutuse tagajärjel. Kohati esineb ka sisseküntud 19. sajandi kinnistupiire, mis on tekkinud kahe kinnistu erinevast maaharimisest (joonis 10, 11).

Alal esinevaid kivistkalmeid võib mudelilt leida, kui need asuvad lagedal, samas ei võimalda mudeli kvaliteet kasutada andmestikku uute objektide kaardistamiseks.



Joonis 10. Reljeefvormid Karula proovialal. DEM varjutusmodel, Lajassaare-Karkküla. 1) väljapiir; 2) sisseküntud kinnistupiir; 3) alumine künniterrass; 4) ülemine künniterrass; 5) kaasaegne tee; 6) Karkküla kivistkalme.



Joonis 11. Karkküla talu kaart 1879. a. Joonisel on märgitud joonisel 10 esitatud reljeefvormid 1 ja 2 (Rahvusarhiiv, EAA.2469.1.10280 leht 3).

Kokkuvõte

Uurimistöös katsetati ALSi andmete rakendatavust varase maakasutuse jälgede kaardistamiseks Lahemaa ja Karula rahvusparkis. ALSi andmetest katsetati nii kogu Eestit katvat tavalennu andmestikku kui ka käesoleva uurimuse jaoks tellitud madallennu andmestikku Lahemaa rahvusparki kohta. Madallennu andmestik oli tavalennu andmestikust oluliselt tihedam – maapinda kirjeldavate punktide tihedus avamaal oli *ca* 4,2 punkti ruutmeetril, metsastel aladel tunduvalt väiksem (2,22 punkti ruutmeetril). Tavalennu andmestiku kvaliteet kõikis suures ulatuses, varieerudes avamaal 0,35 punktist ruutmeetril Lahemaal kuni 0,12 punktini ruutmeetril ning metsastel aladel 0,14 punktist ruutmeetril kuni 0,02 punktini ruutmeetril Karula prooviaalal. Hoolimata madallennu suurest punktitihtedusest metsastunud aladel (*ca* 6 korda tihedam kui tavalennu avatud maastikel) ei võimalda madallennu andmestik kirjeldada metsaalust reljeefi piisava detailsusega, ilmselt metsaaluse reljeefi keerukuse ja erinevate objektide (kännud, mättad jne) keerulisema defineerimise tõttu.

Kirjeldamiseks maapinna reljeefi loodi ALSi andmetest digitaalsed kõrgusmodelid, neist omakorda peenreljeefimodelid. Mudeleid erinevalt esitades ja töödeldes interpreteeriti visuaalselt mudelitel avalduv inimtekkeline peenreljeef. Reljeefilminguid kontrolliti välitöödel.

Madallennu andmestik osutus hästi kasutatavaks avamaastikul asuvate varase põllumajanduse pinnavormide kirjeldamiseks, metsastel alal varjutas pinnavorme kõrgusandmetes olev müra. Suuremad reljeefivormid (kivihunnikud/kalmed) tulid mudelil hästi esile nii lagedal maal kui ka metsas.

Tavalennu andmestik annab hea ülevaate reljeefist lagedatel aladel. Inimtekkelised reljeefielemendid – kraavid, teed, karjäärid jms on reeglina hästi eristatavad, samas on see info enamjaolt juba kaardistatud ja hästi kättesaadav. Meetod on aga sobiv madalamate ja looduses halvasti eristuvate põllumajandusjälgede, nt künnijäljed, kindlakstegemiseks. Piisava andmetiheduse ja kvaliteetse andmetöötluse tulemusel võib siiski tavalennu andmetest saada eeltöökaarte alade kohta, kus teha täiendavaid uuringuid.

Karula keerulises maastikus ALSi andmestik olulist täiendavat infot peenreljeefi kohta ei andnud. Seda peamiselt seetõttu, et 2012. aastal tehtud mõõdistuste andmestik on antud eesmärgi püstituseks liiga hõre. Peale selle asuvad Karulas hästisäilinud ajaloolise maakasutuse jäljed enamasti metsastunud aladel, lagedad on aga viimase 50 aasta jooksul valdavalt mehhanismidega haritud. Madallennu andmete kasutamise kogemuste põhjal ei pruugi ka madallend anda piisavalt detailset andmestikku põllumajanduse jälgede kaardistamiseks metsastel aladel.

Tänuavaldused

Töö aluseks olevaid uuringuid on läbi viidud institutsionaalse uurimistoetuse (IUT 21) ja Euroopa Liidu struktuurivahendite programmi KESTA projektide ERMAS ja ÖKOMAA toel.

Kasutatud kirjandus

- Gruno, A., Liibus, A., Ellmann, A., Oja, T., Vain, A., Jürgenson, H. (2013). Determining sea surface heights using small footprint airborne laser scanning. In *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2013* (24 September 2013, Dresden, Germany), Proceedings of SPIE, Paper 8888 0R.
- Grünthal, E., Gruno, A., Ellmann, A. (2013). Rannaprotsesside monitooring aerolaser-skaneerimise korduvmõõtmistest. *Geodeet* 43 (67), 37–42.
- Grünthal, E., Gruno, A., Ellmann, A. (2014). Monitoring of coastal processes by using airborne laser scanning data. In *Selected papers of the 9th International Conference "Environmental Engineering"*, Vilnius, May 22–23, 2014. Vilnius Gediminas Technical University Press.
- Eelsalu, M., Ellmann, A., Julge, K., Märdla, S., Soomere, T. (2014). Rannaprotsesside ana-toomia laserskaneerimise skalpelliga. Rmt: Aan, A., Narusk, K. (Toim.). Kaugseire Eestis 2014. 47–58. Tallinn, Keskkonnaagentuur.
- Hesse, R. (2010). LiDAR-derived Local Relief Models – a new tool for archaeological prospection. *Archaeological Prospection* 17, 67–72.
- Lang, V., Raid, T., Pärdis, H., Kõivupuu, M., Tiidemann, J., Välja, L., Mäss, V., Vedru, G., Tomps, F., Kurepalu, A., Jonuks, T., Must, M., Öun, M., Hiimäe, M. (2010). Lahemaa ajaloolised maastikud. Tallinn, Huma.
- Lang, V. (2010). Veest, mullast ja kivist Vihasoo-Palmse piirkonna muinasajas. Rmt: Paulus, A., Kaur, E. (Toim.). Uurimusi Lahemaa ajaloolistest maastikest. Teadusartiklid kultuuripärandist, 31–46. Tallinn, Huma.
- Palang, H., Mander, Ü., Luud, A. (1998). Landscape diversity changes in Estonia. *Landscape and Urban Planning* 41(3–4), 163–159.
- Poska, A., Saarse, L., Koppel, K., Nielsen, A.B., Avel, E., Vassiljev, J., Väli, V. (2014). The Verijärv area, South Estonia over the last millennium: A high resolution quantitative land-cover reconstruction based on pollen and historical data. *Review of Palaeobotany and Palynology* 207, 5–17.
- Raet, J., Sepp, K., Kaasik, A. (2008). Assessment of changes in forest coverage based in historical maps. *Forestry Studies* 48, 67–78.
- Štular, B., Kokalj, Ž., Oštir, K., Nuninger, L. (2012). Visualization of lidar-derived relief models for detection of archaeological features. *Journal of Archaeological Science* 39, 3354–3360.
- Tomson, P. (2007). Ajaloolise maakasutuse mõju Karula rahvuspargi maastike, koosluste ja kaitsekorra kujunemisele. Magistritöö. Põllumajanduse ja keskkonna instituut, Eesti Maaülikool http://www.keskkonnaamet.ee/public/Karula_rahvuspargi_kodulehe_materjalid/MAGISTRITOO.pdf.
- Tomson, P., Bunce, R.G.H., Sepp, K. (2015). The role of slash and burn cultivation in the formation of southern Estonian landscapes and implications for nature conservation. *Landscape and Urban Planning* 137, 54–63.

Possible applications of airborne laser scanning (ALS) data in exploring changes in cultural landscapes of Lahemaa and Karula national parks

Summary

The paper introduces the possibilities of airborne laser scanning (ALS) techniques in exploring changes in cultural landscapes of Lahemaa and Karula national parks (NP). The ALS measurements (flight height 2400 m) cover the years 2012 (Karula NP) and 2013 (Lahemaa NP). Lower flight (flight height 1250) measurements were additionally ordered for Lahemaa NP. On the basis of ALS measurements, digital terrain models (DEM) as well as large-scale DEM of the test area were created. Different visualization approaches (hill shading, slope gradient, colour cast, colour contrast) were used to interpret fine-relief visually in the studied areas. Landscape elements referring to historical land-use trail in relief (ditches, field margins, stone walls, graves, piles of stones, ploughing mosaics, stone heaps and other regular occurrences in the landscape) were described. Low flight data models described well the structural elements of ancient fields for open landscape. The model of major relief forms (piles of stones/graves) turned out to be well expressed for the open area and woods. Regular flight data gives a good overview of the existing topography in the exposed areas while in the forested area the results were modest due to “noise”.

Kuumalainete ja soojussaarte satelliitseire

Valentina Sagris, Mait Sepp

Tartu Ülikooli geograafia osakond, Vanemuise 46, 51014 Tartu

Kokkuvõte

Kuumalained ulatuvad meie aladele järjest sagedamini, tekitades linnades nn soojussaare efekti. On kaks erinevat lähenemist, kuidas kuumalainetest põhjustatud soojussaarte intensiivsust hinnata: (a) otsesed õhutemperatuuri mõõtmised ja (b) kaugseire abil saadud maapinna temperatuuri kaudu. Soojussaarte efekti on Eestis uuritud vähe ja maapinna temperatuuri kaugseire meetodeid ei ole seni Eesti linnade mikrokliima uuringutes kasutatud.

Esitatud analüüs näitab selgelt, et tegelikult on linna soojussaared palju laialdasemad, kui seni oletatud. Satelliitpiltide analüüs näitas, et kuigi Tallinn ei kuulu miljonilinnade sekka ning on mereäärne ja võrdlemisi roheline linn, on ka siin küllaltki suureks probleemiks linna soojussaare efekt. Kuumalainete ajal puudutab see probleem enam-vähem kõiki Eesti tiheasustusalasid. 25. juulil 2014 tehtud satelliitpildi andmetest selgub, et kõikides Harjumaa asulates tõusis temperatuur ümbritsevaga võrreldes +3 kuni +5 °C kõrgemale. Seega võime väita, et Eesti linnades ja asulates avaldub soojussaare efekt ja seda mitte vähemal määral kui suurlinnades.

Soojusaartest tugevalt mõjustatud linnaosad on ka suurema asustustihedusega ning seal elab rohkem riskirühma kuuluvaid inimesi – väikelapsi ja vanemaealisi. Madalamate kinnisvarahindade tõttu koondub korrusmajarajoonidesse ka mõneti vaesem elanikkond, kelle võimekus kliimamuutustega kohaneda on väiksem. Kõik see muudab Tallinna korruselamutega asumid kliimamuutuste seisukohalt haavatavaks.

Võtmesõnad: maapinna kiirgustemperatuur, soojusinfrastruktuur, sensor, kuumalained, soojussaared, inimeervõrk

Sissejuhatus

Kuumalained on üks peamisi kliimariske, mis mõjutab linna seoses praeguste ja tuleviku kliimamuutustega. On väga tõenäoline, et kuumalainete esinemissagedus ja intensiivsus kasvab. Nendega kaasneva linna soojussaare efekti teke on seotud eelkõige linnade maakasutuslike ja ehituslike iseärasustega, kus tehismaterjalid neelavad suurema osa päikese kiirgusest, mille tõttu soojenevad teed ja ehitised, mis omakorda kütavad linnaõhku nii öösel kui päeval (Oke, 2006; Voogt, Oke, 2003). Keskmise temperatuuri erinevus linnas ja maal võib varieeruda +3 kuni +10°C. Viimased uuringud Euroopas (nt Steeneveld jt, 2012) näitavad, et soojussaarte efekt ei ole tingimata vaid suuremate linnade probleem – seda esineb ka väiksemates asulates.

Kuumalained ulatuvad meie aladele järjest sagedamini. Teaduskirjanduses koh-tame erinevaid õhutemperatuuri piirmäärasid, mille ületamist peetakse inim-tervisele ohtlikuks. Näiteks peetakse paljudes riikides ohtlikuks öid, mil õhute-mperatuur ei lange alla +25 °C. Eestis, Türi ilmajaama andmetel pole aga siin vaadeldava 60 aasta jooksul (1951–2010) ühtegi sellist ööd veel esinenud. Eestis on defineeritud hädaolukorraks (kuumalaineks) sellist erakordselt kuumat ilma, kus õhutemperatuur on kõrgem kui +30 °C kauem kui kaks päeva (Terviseamet, 2011). Sellist olukorda on Eestis ajavahemikul 1961–2010 esinenud kümnel suvel (kokku 32 korral, neist 20 korda viimasel kümnendil) (Sagris, Sepp, Gauk, 2015; Tammets, 2012). Näiteks 2010. aastal oli Eestis erakordselt kuum suvi, mil kuumalaine kestus ületas eelneva 60 aastanäidu. Võrus kestis siis kuumalaine seitse päeva järjest (22.–28. juuli). Kuumad olid ka järgnevate aastate suved, kuid Riigi Ilmateenistuse statistika järgi pole need 2010. aasta rekordeid siiski üle-tanud. Kuumalaine jõudis Eestisse ka 2014. aasta suvel, mil 6 päeval järjestmöö-deti mõnes ilmajaamas +30 °C (Riigi Ilmateenistus, 2016). Veel üheks laialt-levinud kuumalainete defineerimise piiriks on ööpäeva maksimumtemperatuuri 98. protsentiil. Türi ilmajaama andmetel on perioodil 1951–2010 ööpäeva maksimum-temperatuuri 98. protsentiil +27 °C. See võiks tähistada kuumalaine piiri Eesti oludes (Sepp, Sagris, Tamm, 2015) ja on aluseks ka käesoleva töö kuumapäevade arvu-tustes. Kui jätame 2010. ja järgnevad aastad välja, siis on kuumapäevade esinemis-sageduses toimunud järsk tõus: perioodil 1951–1980 oli kokku 32 kuumat päeva ja aastatel 1981–2009 juba 83 (Sepp, Sagris, Tamm, 2015).

Kõrged temperatuurid suurendavad haigus- ja surmajuhtumite arvu, siseruumide ülekuumenemist ning vähendavad tööjõu produktiivsust, kuid eriti tundlikud on kuumalainete suhtes vanurid ja väiksed lapsed. Vahest kõige tuntum ja traagilisem oli Euroopas 2003. aasta kuumalaine, mille jooksul suri Prantsusmaal üle 14 000 peamiselt vanema inimese. Muidu langevas suremuse trendis oli Eestis 2010. a kuumalaine ajal keskmine liigsuremus 31% kõrgem eeldatud suremusest, tuues juunis, juulis ja augustis kaasa 191 liigsurmajuhtumit (Rekker, 2013).

On kaks erinevat lähenemist, kuidas soojusaarte intensiivsust hinnata: (a) otsesed õhutemperatuuri mõõtmised ja (b) kaugseire abil saadud maapinna temperatuuri kaudu (ingl k *land surface temperature*, LST). Otseseid mõõtmisi tehakse kas meteo-jaamades või mööda profiili maastikul liikudes. Nende mõõtmiste tulem on õhu-temperatuur 1–2 meetri kõrgusel maapinnast. Maapinna temperatuur on aga Maal asuvate objektide satelliidilt mõõdetud soojusemissioon. Kaugseire eeliseks on see, et mõõtmised katavad suuri alasid, mis võimaldab teha järeldusi soojusaare mustrist (Arnfield, 2003; Voogt, Oke, 2003). Mitmed autorid on uurinud õhu ja maapinna temperatuuri seoseid ning jõudnud järeldusele, et need on tugevas korrelatsioonis, kuid seos sõltub maakattest (Schwarz jt, 2012).

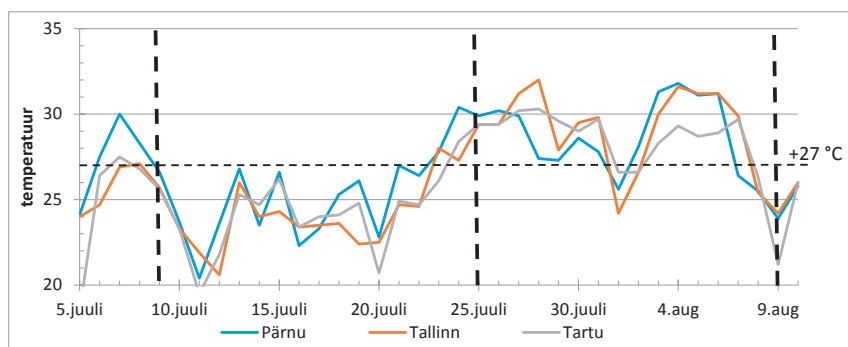
Käesoleva uuringu eesmärgiks oli kasutada kaugseire andmetest saadud maapinna temperatuuri selleks, et hinnata 2014. a kuumalaine mõju Eesti linnadele ja asulatele ning uurida, kui ulatuslikud ja mis suurusjärgus soojusaare efektid meil esinevad. Artiklis kirjeldatud uuring viidi läbi projekti „Kliimamuutuste mõjude hindamine ja kohanemismeetmete väljatöötamine planeeringute, maakasutuse, inimtervise ja

päästevõimekuse teemas“ (KATI, <http://www.geograafia.ut.ee/et/teadus/kati-kliimakoohanemine>) raames. KATI projekti eesmärgiks oli luua asustuse ja inimese temaatikas teadmiste baas Eesti riikliku kliimamuutustega kohanemise arengukava koostamiseks ning välja pakkuda ja hinnata kliimamuutustega kohanemise meetmeid. KATI uuringud tehti planeerimise ja maakasutuse, rannikualade ning maaparanduse, tervise ja päästevõimekuse valdkonnapõhiste analüüsidenä. Siin esitatud tulemusi kasutati projektis nii inimintervise kui ka linnaplaneerimise teemade juures.

Andmed ja metoodika

Satelliitpiltide valik

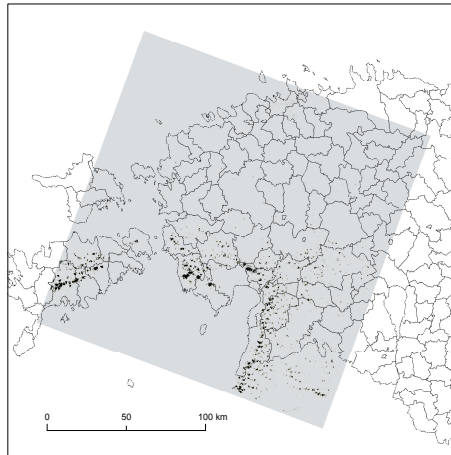
2014. aasta juuli lõpus mõõdeti paljudes Eesti ilmajaamades ööpäeva maksimumtemperatuuriks +30 °C ja enam. Tallinnas kestis üle +27 °C periood kaheksa päeva ning pärast paaripäevast pausi vältas kuum ilm veel kuus päeva (joonis 1). Kuumalaine analüüsimiseks kasutasime pilte Landsat-8 satelliidilt, mille pardal on kaks põhiinstrumenti: *Operational Land Imager* (OLI) ehk spektri optilises piirkonnas töötav skanner ja *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) ehk soojusinfra punane sensor. Satelliitpildid on tehtud 9. juulil, s.o enne kuumalaine algust, ja 25. juulil, kuumalaine algfaasis. Mõlemad pildid on tehtud meie aja järgi (s.o suveaja järgi UTC +3) kell 12:30 (tabel 1). Need kaks pilti katavad ala Tallinnast Pärnuni (joonis 2), osaliselt saared, Lääne- ja osaliselt ka Kesk-Eesti kuni Viljandi ja Türiini



Joonis 1. Maksimaalne öhutemperatuur Eesti linnades 2014. a suvel kuumalaine ajal (Riigi Ilmateenistuse andmed); vertikaalsete kriipsjoontega on lisatud Landsat-8 stseeni 188/019 pildistamisajad.

Tabel 1. Kasutatud satelliitpiltide metaandmed.

Rada/ rida	Pildistamise päev	Pildistamise kuupäev	Pildistamise aeg, UTC	Kohalik aeg	Pilvkate, %
188/019	190	9 JUL 2014	09:29:54.5673254Z	12:29:54	2,91
188/019	206	25 JUL 2014	09:29:56.5794752Z	12:29:56	0,82



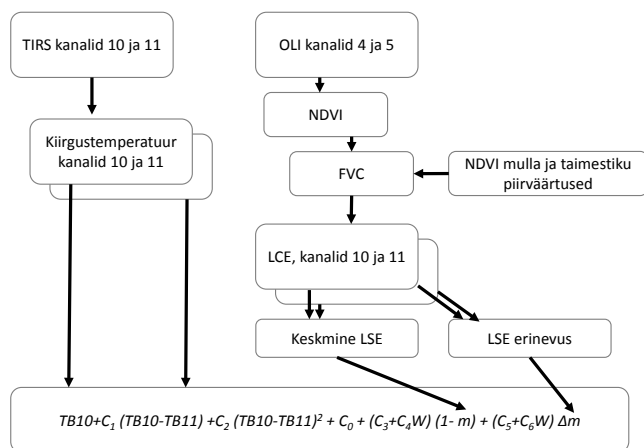
Joonis 2. Landsat-8 stseeni 188/019 ulatus ja 25. juuli 2014 pilvisus (mustana).

Maapinna temperatuuri leidmine

Maapinna temperatuur on üheks võtmeparameetriks maapinna füüsiliste omaduste uurimisel nii globaalsel kui ka kohalikul tasemel – seda kasutatakse nii globaalsete kliimamuutuste kui ka linnade mikrokliima uurimustes. See on Maal asuvate objektide temperatuur, mida me tajume, kui oleme nendega otseses kontaktis ehk kui me neid puudutame. Seda nimetatakse ka pinna „naha“ temperatuuriks (*surface skin temperature*) ja mõõdetakse tavaliselt Kelvini skaalas.

Soojusinfrapunases spektris kaugseire on viimasel ajal muutunud üheks oluliseks vahendiks maapinna termiliste omaduste uurimisel. On välja töötatud ja avaldatud palju maapinna temperatuuri arvutamise algoritme, nagu näiteks jagatud akna algoritm (*Split-Window algorithm*), kaksiknurga algoritm (*Dual Angle algorithm*), üksikkanali algoritm (*Single-Channel algorithm*) jne. Põhjaliku ülevaate nendest meetoditest leiab Li jt (2013) artiklist.

Termilises infrapunases spektris, kus varasemad analoogsed instrumendid (Landsat TM ja ETM+) omasid ainult ühte kanalit, on Landsat-8 TIRS sensoril kaks kanalit (10 ja 11, mõõdavad infrapunakiirguse lainepikkuste vahemikke vastavalt 10,60–11,19 ja 11,50–12,51 μm). See asjaolu lubas meil kasutada jagatud akna algoritmi, nagu seda kirjeldasid Skoković jt (2014) ja Sobrino jt (2008). Algoritm kasutab (joonis 3) satelliidi kõrgusel mõõdetud kiirgustemperatuuri (*At-Satellite Brightness Temperature*, TB) mõlemast TIRSi kanalist koos maapinna kiirgusvõimega (*Land Surface Emissivity*, LSE) selleks, et arvutada maapinna temperatuuri iga pildipiksli kohta. Maapinna emissiooni leidmiseks kasutatakse OLI sensori spektraalseid kanaleid 4 (punane) ja 5 (lähisinfrapunane). Nende abil arvutatakse normeeritud vahe vegetatsiooniindeks (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI) ja viimase abil taimkatte katvuse indeks (*Fractional Vegetation Cover*, FVC). Satelliitandmete töötlemisest detailsemalt järgmises alalõigus.



Joonis 3. Satelliitandmete töötlemine.

Satelliitandmete töötlemine

1. samm – TIRSi piltide radiomeetriline korrektsioon ja kiirgustemperatuuri arvutamine

Standardne Landsat-8 produkt USGS EarthExplorer portaalist (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) on kalibreeritud digiväärtustega multispektraalne pilt mõlemast sensorist – OLI ja TIRS. Standardprodukt on 16-bitises täisarv-formaadis ja vajab ümberskaleerimist – OLI kanalite puhul atmosfääri ülapiiri (*Top Of Atmosphere*, TOA) peegelduseks ning TIRSi kanalite puhul atmosfääri ülapiiri kiirguseks.

Ümberskaleerimiseks vajalik info asub pildi metaandmete failis (tabel 2). Sellest failist leiame ka konstante, mida vajame heledustemperatuuri kalkuleerimiseks http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php (tabel 3).

Tabel 2. Kanalite spetsiifilised skaleerimise koefitsiendid.

Kanal	REFLECTANCE_MULT_BAND_
4	2,0000E-05
5	2,0000E-05
	RADIANCE_MULT_BAND_
10	3,3420E-04
11	3,3420E-04

Tabel 3. TIRSi soojuskonstandid.

Kanal	K1	K2
10	774,89	1321,08
11	480,89	1201,14

TIRSi kanalite väärtused konverteeriti TOA kiirguseks kasutades järgmist valemit ja andmeid metafailist:

$$L_{\lambda} = M_L DN + A_L \quad (1),$$

kus

- L_{λ} TOA spektraalne kiirgus (Watts/(m² * srad * μm))
- M_L kanali spetsiifiline skaleerimise koefitsient pildi metaandmetest (tabel 2)
- A_L kanali spetsiifiline skaleerimise koefitsient pildi metaandmetest (RADIANCE_MULT_BAND_10 and _11 = 0.10)
- DN pildi pikslite kalibreeritud digiväärtused

Pärast seda konverteeriti TIRSi kanalite kiirgus heledustemperatuuriks kasutades tabelis 3 toodud konstante ning järgmist valemit:

$$TB = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}}\right) + 1} \quad (2),$$

kus

- TB heledustemperatuur sensori juures (*At-Satellite Brightness Temperature*) (Kelvini kraadid)
- L_{λ} TOA kiirgus (Watts/(m² * srad * μm))
- K_1 kanali spetsiifiline konverteerimise konstant pildi metaandmetest (tabel 3)
- K_2 kanali spetsiifiline konverteerimise konstant pildi metaandmetest (tabel 3)

2. samm – OLI kanalite konverteerimine TOA peegelduseks, NDVI ja FVC arvutamine

OLI sensori spektraalsetele kanalitele 4 ja 5 rakendati radiomeetrilist korrigeerimist ja TOA peegelduse leidmiseks viidi sisse päikese kõrguse korrigeerimine kasutades skaleerimise koefitsiente tabelist 2 (valem 3) ja päikese kõrguse nurka pildistamishetkel (valem 4):

$$\rho_{\lambda}' = M_p DN + A_p \quad (3),$$

kus

- ρ_{λ}' TOA peegeldus päikese kõrgusega arvestamata
- M_p kanali spetsiifiline skaleerimise koefitsient pildi metaandmetest (tabel 2)
- A_p kanali spetsiifiline skaleerimise koefitsient pildi metaandmetest (REFLECTANCE_ADD_BAND_4 and _5 = -0.10)
- DN pildi pikslite kalibreeritud digiväärtused

Edasi:

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\sin(\theta_{SE})} \quad (4),$$

kus

$\rho\lambda$ TOA peegeldus

θ_{SE} päikese kõrgus pildistamishetkel pildi metaandmetest (SUN_ELEVATION).

NDVI leiti järgmiselt:

$$NDVI = \frac{\rho\lambda_5 - \rho\lambda_4}{\rho\lambda_5 + \rho\lambda_4} \quad (5).$$

NDVI väärtusi kasutati sisendina taimkatte katvuse indeksi (FVC) arvutamiseks. FVC näitab taimestiku osa piksli pindalast. Jagatud akna algoritm kasutab seda selleks, et kalkuleerida maapinna emissiooni (LSE). FVC arvutati iga kanali jaoks järgmiselt:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{(SOIL)}}{NDVI_{(VEGETATION)} - NDVI_{(SOIL)}} \quad (6).$$

3. samm – maapinna kiirgusvõime (LSE) arvutamine

2. sammu käigus leitud FVC väärtusi kasutati sisendina maapinna kiirgusvõime (LSE) leidmiseks rakendades jagatud akna algoritmi valemit (7). LSE mõõdab maapinna iseloomulikku omadust konverteerida päikesest saadud energia soojuseks ja seda edasi emiteerida. Arvutamiseks vajalikud mulla ja taimestiku kiirgusvõime koefitsiendid on toodud tabelis 4.

$$LSE = \epsilon_s \cdot (1 - FVC) + \epsilon_v \cdot FVC \quad (7),$$

kus

ϵ_s mulla kiirgusvõime (tabel 4)

ϵ_v taimkatte kiirgusvõime (tabel 4)

FVC taimkatte katvuse indeks valemist 6

Tabel 4. Kiirgusvõime.

Kiirgusvõime	Kanal 10	Kanal 11
ϵ_s	0,971	0,977
ϵ_v	0,987	0,989

Allikas: Skoković jt, 2014; Sobrino jt, 2008.

4. samm – maapinna temperatuuri (LST) leidmine

Esiteks leiti igale pikslile LSE keskmine ja erinevus kahe soojuskanali vahel:

$$LSE\ mean = m = \frac{LSE_{10} + LSE_{11}}{2} \quad (8a).$$

$$Difference\ of\ LSE = \Delta m = LSE_{10} - LSE_{11} \quad (8b).$$

Teiseks pandi kõik eelnevalt saadud väärtused jagatud akna algoritmi lõpp-valemisse kokku:

$$LST = TB_{10} + C_1 (TB_{10} - TB_{11}) + C_2 (TB_{10} - TB_{11})_2 + C_0 + (C_3 + C_4 W) (1 - m) + (C_5 + C_6 W) \Delta m \quad (9),$$

kus

TB_{10} ja TB_{11} kanalite 10 ja 11 kiirgustemperatuurid

C_0 - C_9 jagatud akna (*Split-Window*) algoritmi konstandid (tabel 5)

m kanalite 10 ja 11 keskmine LSE

Δm kanalite 10 ja 11 LSE erinevus

W veeauru hulgad atmosfääris 9. ja 25. juulil 2014.

Allikas: AERONETi koduleht <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>

Tabel 5. Jagatud akna (*Split-Window*) algoritmi konstandid.

Konstant	Väärtus
C0	-0,268
C1	1,378
C2	0,183
C3	54,300
C4	-2,238
C5	-129,200
C6	16,400

Allikas: Skoković jt, 2014; Sobrino jt, 2008

Soojussaarte mõju hindamine

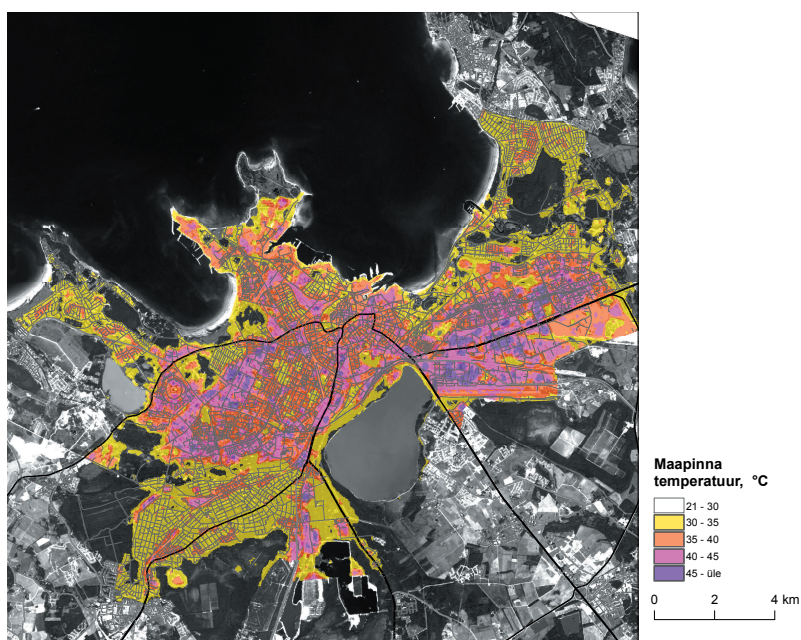
Nagu mainitud, avaldavad kuumalained ja soojussaared otsest mõju inimeste tervisele (Rekker, 2013). Terviseuuringud põhinevad tavaliselt vaid ilma-jaamadest saadud andmetel ja otsivad statistilisi, harvem ka ruumilisi seoseid tervise ning õhutemperatuuri vahel. Peamisteks riskigruppideks, keda uuritakse, on alla 4-aastased lapsed ja üle 65-aastased vanemaealised.

Kuna andmeid soojussaare efekti esinemise kohta Eestis on üsna vähe, siis ei ole maapinnal asuvate objektide temperatuuri ja selle põhjustatud mõjusid tervisele veel uuritud. Soojussaarte ja nende mõju täpsemaks ruumiliseks analüüsiks on vaja andmeid elanikkonna tervise kohta, seejuures peavad need olema varustatud võimalikult detailse asukohainfoga. Seega on soojussaarte potentsiaalse mõju hindamise üks peamisi etappe elanikkonna riskigruppide tundlikkuse kaardistamine. Antud juhul on vaadatud kõige noorema (0–4-aastased) ja vanema (65-aastased ja vanemad) elanikkonna paiknemist linnades ja nende osakaalu ülejäänud vanuserühmade suhtes. Ruumilised andmed Tallinna rahvastiku vanuselise jaotumuse kohta 100×100 m ruudustikuna on saadud Statistikaametist. Ühendades riskirühma kuuluvate elanike paiknemise ehk tundlikkuse kaardikihi satelliitpildilt saadud soojussaarte infoga, saadakse mõjukaart riskigrupi elanike kohta, ehk siis saame teada, kui paljusid inimesi võib soojussaar potentsiaalselt negatiivselt mõjutada.

Tulemused ja arutelu

Soojussaared Tallinnas ja Harjumaal 25. juulil 2014

Joonis 4 näitab temperatuuri olukorda Tallinnas 25. juulil 2014 kell 12:30. Sellel päeval mõõdeti Tallinn-Harku meteoroloogiajaamas maksimaalseks õhutemperatuuriks +27,9 °C (kell 12).

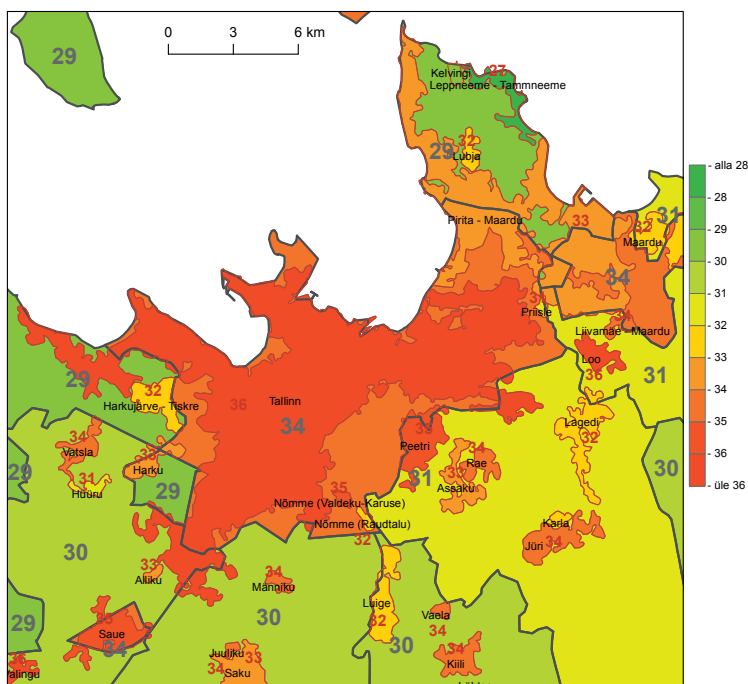


Joonis 4. Pinnatemperatuur Tallinna linna territooriumil 25. juulil 2014. Kasutatud Landsat-8 satelliitpilt on tehtud kell 12:30. Sellel päeval oli maksimaalne õhutemperatuur Tallinnas üle +29 °C (mõõdetud Harku ilmajaamas kell 12:00). Värviga tähistatud pinnad on erineva soojustugevusega alad +30 kraadist 5-kraadise sammuga.

Värviga tähistatud pinnad on erineva soojustugevusega alad alates +30 kraadist 5-kraadise sammuga. Satelliitfotode järgi on praktiliselt kogu Tallinnas maapinna temperatuur oluliselt kõrgem kui linnast väljas asuvas meteoroloogiajaamas 2 m kõrgusel mõõdetud õhutemperatuur. Ühelt poolt väljendab see satelliitfotodelt pärit andmestiku omapära, st me saame sellelt pinna-, mitte õhutemperatuuri. Teisalt, kui asfaltplatsi temperatuur on +45 °C, siis õhukiht selle kohal on samuti oluliselt kõrgema temperatuuriga kui ilmajaamas klassikaliselt murupinnase kohal mõõdetud õhutemperatuur.

Satelliitfotolt loeb väga täpselt välja soojussaarte mustri. Peamiselt torkavad silma Tallinna „mäed“, aga teisalt Nõmme, Pirita ja Kalamaja, kus kõrghaljastus ning parkmets hoiab tagasi soojussaare teket. Kõrghoonestusega elurajoonides, näiteks Lasnamäel ja Õismäel, nagu ka suurematel tööstus- ja kaubandusaladel, on pinnatemperatuur Harkus mõõdetavast õhutemperatuurist koguni üle 15 kraadi kõrgem ehk temperatuur küünib +45...+50 °C.

Tallinna ja seal asuvatest parklatest ja korruselamutest tekkinud soojussaartega on kõik selge. Kuid tegelikult paistavad satelliidipildilt kuumatäppidena silma eranditult kõik asulad. Satelliidilt saadavate temperatuurandmete ühildamisel omavalitsuste ja tiheasustusega paikkondade piiridega saame arvutada nende alade keskmise maapinna temperatuuri. Sellise keskmistamisega tulevad välja oma-



Joonis 5. Soojussaare efekt Tallinnas ja selle ümbruse tiheasumites. Halli piirjoonega on märgitud omavalitsuse piir, halli numbriga omavalitsuse keskmine pinnatemperatuur. Punase piirjoonega on märgitud tiheasumi piir, punase numbriga tiheasumi keskmine pinnatemperatuur. Leppneeme-Tammneeme tiheasumite keskmist temperatuuri ei olnud võimalik määrata, kuna mõlemad asuvad väljaspool satelliidipildi ulatust.

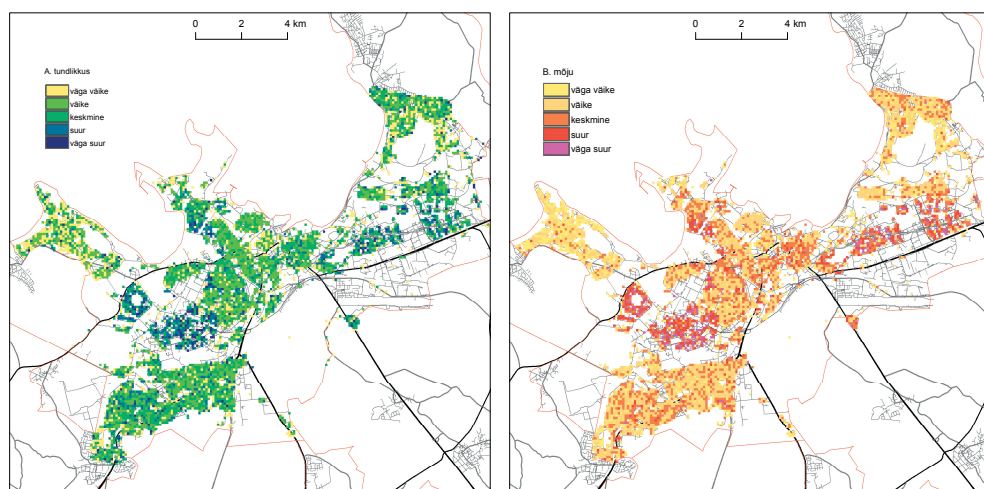
valitsustes domineerivad maakasutusmusterid – rohkemate looduslike aladega valdade keskmine temperatuur on mõnevõrra madalam kui valdades, kus on näiteks suured tootmis- ja logistikakeskused või turbakaevandused. Valdade keskmised temperatuurid on taustaks, millega võrrelda tiheasumite keskmist temperatuuri. Tiheasustusega paikkonnana on Statistikaamet defineerinud ala, kus hoonete-vahe-line kaugus ei ületa 200 m ja elanikke on vähemalt 200. 25. juulil tehtud satelliitpildi andmetest selgub, et kõikides Harjumaa asulates tõusis temperatuur ümbritsevaga võrreldes +3 kuni +5 °C kõrgemale (joonis 5). Seega võime väita, et Eesti linnades ja asulates avaldub soojussaare efekt juba praegu ning mitte vähemal määral kui teaduskirjanduses analüüsitud Lääne-Euroopa jt suurlinnades.

Soojussaarte mõju Tallinnas

Ühitades Statistikaametilt saadud rahvastikuandmed satelliitpildilt saadud maapinna temperatuuriga, tulevad üsna selgelt esile need piirkonnad, kus riskigrupi inimesed (alla 4- ja üle 65-aastased) on kuumalainetest tõepoolest ohustatud.

25. juuli kuumalaine mõju Tallinna korruselamute piirkondades Lasnamäel, Õismäel, Mustamäel ja Pelgurannas oli valdavalt suur kuni väga suur (joonis 6B). See tähendab, et mainitud piirkondades elab palju riskirühmadesse kuuluvaid inimesi, nende osakaal elanikkonnast on suur (joonis 6A), aga ka kuumalaine tekitatud soojussaare efekt on nendel aladel keskmisest tugevam – suurte asfalt- ja betoonpindadega hoonestusalad võimendavad paiga temperatuuri tõusu koguni 20 kraadi võrra võrreldes ilmajaamas mõõdetud õhutemperatuuriga.

Madalamate kinnisvarahindade tõttu koondub korrusmajarajoonidesse ka mõneti vaesem elanikkond, kelle võimekus kliimamuutustega kohaneda on väiksem. Kõik see muudab Tallinna korruselamutega asumid kuumalainete seisukohalt haavatavaks ning tänaste sotsiaalsete protsesside põhjal võib eeldada haavatavuse kasvu nendes asumites.



Joonis 6. (A) Tundlikkus soojussaare efekti suhtes (riskigrupid kokku) ja (B) mõju Tallinnas 25. juulil 2014.

Üks käesoleva analüüsi puudusi on see, et soojussaarte mõju elanikele on vaadeldud üksnes seostatuna nende elukohaga. Ostukeskuste, tööstuse ja transpordi poolt hõivatud suurte alade kaudne mõju oma erakorraliste temperatuuridega jäi analüüsist välja. See tähendab, et me ei vaatle terviseriske, mis ähvardavad riskirühma kuulujat näiteks supermarketi ülekuumenenud parkimisplatsi või suure ristmiku ületamisel. Vaatamata sellele, et valitud riskigruppide esindajad liiguvad linnaruumis vähem, ei tähenda see, et soojussaarte mõju leevendavad linna planeerimismeetmed peavad piirduma vaid elamualadega. Inimesed satuvad töö ja argitoimetuste tõttu pidevalt elamualadelt väljapoole. Näiteks on multifunktsionaalne Tallinna kesklinn elurajoonide järel järgmine riskipiirkond, kus kuumalainest tingitud soojussaar avaldab suurt mõju (joonis 6B). Samas, KATI projekti käigus selgus, et andmestik terviseprobleemide ja suremuse kohta on väga nõrgalt ruumiga seotud – tervisestatistika on olemas ainult omavalitsuste tasemel. Seega, kui tahta uurida soojussaarte mõju konkreetsele haigusele, on see võimalik üksnes kogudes detailseid andmeid haigete paiksuse/liikumise kohta linnas. Tulevikus on mõistlik linna soojussaarte kaardid ühendada näiteks erinevate mobiilsusuringutega.

Kuumalainete mõju kohta võib üsna kindlalt väita, et meie linnad ja asulad muutuvad edaspidi aina haavatavamaks. Siin võime arutleda kahe aspekti üle – sotsiaalsed arengud ja kliimamuutused. Sotsiaalne aspekt ületab arengukiiruse ja mõju suuruse poolest tunduvalt kliimamuutuste suundumusi. Tendentsid on väga lihtsad ja loogilised: Eestis jätkub linnastumine ja rahvastiku vananemine. See tähendab, et linnadesse koguneb aina rohkem inimesi ja vanurite kontsentratsioon nendes aina suureneb. Kliimamuutustega on asjad keerulisemad. Värsked prognoosid pole kuigi lohutavad: kliima soojenemine jätkub, tõuseb ka suvede keskmine õhutemperatuur ning kasvab kuumapäevade arv (Sepp, 2015). Samas tuleb meeles pidada, et kliimaprognoosides on suurel hulgal määramatust. Kuid me peaksime teadvustama, et praegu liiguvad protsessid selles suunas, kus kuumalained saavad lähitulevikus tavaliseks nuhtluseks, need võivad kesta nädalaid ja muutuda paljudele meie lähikondsetele ohtlikuks. Nii tuleks juba praegu mõelda sellele, kuidas uute kliimaoludega kohaneda ja riske maandada.

Järeldused

Landsat-8 piltide kasutamine on igati sobilik soojussaarte efekti uuringutes, andes ühtlase andmestiku üle suurte alade. Andmestikul on aga üks kitsaskoht: satelliidi kordusvisiidi aeg on 16 päeva. Seega on raske uurida ilmastikunähtuste dünaamikat, näiteks ei olnud meil võimalik tabada kuumalaine haripunkti või hinnata olukorda kuumalaine lõpus, mil pinnasoojus on pika aja jooksul akumulunud. Lühiajalised ilmastikusündmused ei pruugi üldse pildile jääda.

Käesoleva töö ja KATI projekti käigus saadud kogemuste põhjal võiksid edasised uuringud liikuda kolme suunda: (a) regulaarne maapinna temperatuuri seire linnades, kaasates ka uusi, lühema korduspildistamise ajaga sensoreid (nt Sentinel-3); (b) maapinna temperatuuri ja õhutemperatuuri seoste edasine selgitamine; (c) maapinna temperatuuri uuringute ühendamise ruumiga paremini seostatavate tervise- või mobiilsusandmetega.

Viidatud kirjandus

- Arnfield, A.J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.* 23, 1–26.
- Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I. F., Sobrino, J. A. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 131 (2013) 14–37.
- Oke, T. R., (2006). IOM Report No. 81, WMO/TD No. 1250. 06.05.14. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites, vol. 2006.
<http://www.urban-climate.org/documents/IOM-81-UrbanMetObs.pdf>
- Riigi Ilmateenistus (2016). Vaatlusandmed.
<http://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/vaatlusandmed>
- Rekker, K. (2013). 2010. aasta erakordselt kuum suvi Eestis ja selle mõju rahvastiku suremusele. Magistritöö rahvatervishoiu. TÜ Tervishoiu instituut. Tartu 2013.
- Sagris, V., Sepp, M., Gauk, M. (2015). Kuumalained ja soojussaared - Tallinna näide. Antti Roose (Toim.). Kliimamuutustega kohanemine Eestis - valmis vääramatuks jõuks? (68–78). Tartu Ülikooli Kirjastus. (Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis; 112).
- Schwarz, N., Schlink, U., Franck, U., Großmann, K. (2012). Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators—An application for the city of Leipzig (Germany). *Ecological Indicators* 18 (2012), 693–704.
- Steenefeld, G. J., Koopmans, S., Heusinkveld, B. G., van Hove, L. W. A. & Holtslag, A. A. M. (2011). Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands.
- Sepp, M., Sagris, V., Tamm, T. (2015). Eesti asub kliimamuutuste tulipunktis. *Eesti Loodus*, 66 (8), 8–13.
- Sepp, M. (2015). Kliimamuutustega kohanemise klimatoloogilised aspektid. Antti Roose (Toim.). Kliimamuutustega kohanemine Eestis - valmis vääramatuks jõuks? (20–37). Tartu Ülikooli Kirjastus. (Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis; 112).
- Skoković, D., Sobrino, J.A., Jimenez-Munoz, J.C., Soria, G., Julien, Y., Mattar, C., Jordi C. (2014). “Calibration and Validation of Land Surface Temperature for Landsat 8 – TIRS Sensor”, Land product Validation and Evolution, ESA/ESRIN Frascati (Italy), pp 6-9, January 28-30, 2014.
- Sobrino, J.A., Jimenez-Munoz, J.C., Soria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., Plaza, A., Martinez, P. (2008). Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2008, 46, 316–327.
- Tammets. T. (2012). Eesti ilma riskid. Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut. 2., täiendatud ja parandatud trükk. Tallinn, 152 lk.
- Terviseamet (2011). Erakordselt kuum suvi ja hädaolukorra riskianalüüs. Tallinn.
http://rahvatervis.ut.ee/bitstream/1/4749/1/Terviseamet2011_1.pdf

Voogt, J.A., Oke, T.R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*. 86, 370–384.

Projekt "Kliimamuutuste mõjude hindamine ja kohanemismeetmete väljatöötamine planeeringute, maakasutuse, inimtervise ja päästevõimekuse teemas" (KATI): <http://www.geograafia.ut.ee/et/teadus/kati-kliimakohanemine>.

Remote sensing of heat waves and urban heat islands

Summary

Heat waves are reaching our cities more frequently nowadays leading to the so-called Urban Heat Island (UHI) effect. There are two different approaches to how heat waves and the heat island intensity assessed: (a) direct measurements of air temperature or (b) through the remotely sensed land surface temperature (LST). In Estonia the UHI effect has been studied little and the LST method has not being used yet in studies of Estonian cities' microclimate.

The analysis clearly reveals larger UHI effect than previously assumed. Satellite images showed that Tallinn, which is not among the millionaire cities and which is seaside located and a relatively green city, also suffers from quite strong UHI effect. During heat waves periods practically all of Estonian urban settlements suffer from the effect. A satellite image from 25th of July, 2014 shows that for all settlements of Harju region the temperature is 3-5° C higher than in the surroundings. Therefore, we can conclude that the Estonian cities and towns suffer the heat island effect, and not to a lesser extent than the large cities as described in scientific literature.

Parts of the city severely affected by heat have also higher population density and more so-called vulnerable people living there –small children and elderly. Somewhat poorer population with less capacity to adapt to the climate change concentrates in the apartment buildings with lower real estate prices. All this makes Tallinn dormitories more vulnerable in terms of heat waves and climate change.

Eestis esinevate konvektiivsete tormide pilv-maa-välke ja rahet detekteerivad parameetrid kaksikpolarimeetrilise Doppleri ilmaradari andmete põhjal

Tanel Voormansik^{1,2}, Pekka J. Rossi³, Dmitri Moisseev⁴,
Tarmo Tanilsoo, Piia Post¹

1 Tartu Ülikool, füüsika instituut, W. Ostwaldi 1, 50411 Tartu

2 Keskkonnaagentuur, Mustamäe tee 33, 10616 Tallinn

3 Vaisala Oy, Helsingi, Soome

4 Helsingi Ülikool, füüsika osakond, Helsingi, Soome

Kokkuvõte

Kaasaegsed kaugseirevahendid, nagu kaksikpolarimeetriline Doppleri ilmaradar ja pikalainelised välgudetektorid, annavad konvektiivsete tormide uurimiseks palju olulist teavet. Käesolevas töös on uuritud konvektiivsete tormide automaatset detekteerimist radariandmetest 4-aastase andmestiku põhjal (2011–2014) ja nendes tormides pilv-maa-välkude ning rahe esinemise riski hindamise võimekust, kasutades erinevaid radari, välgudetektorite võrgustiku ning atmosfäärisondeeringute andmetel põhinevaid indikaatoreid. Võrreldud indikaatoritest oli parim pilv-maa-välkude indikaator 20 dBZ peegelduvuse maksimaalne kõrgus ($CSI = 0,390$) ja kaksikpolarimeetrilise radari andmetel põhineva rahe klassifikatsiooniga ühtis kõige paremini tormiala maksimaalne peegelduvus ($CSI = 0,554$). Lisaks on uurimuses analüüsitud detekteeritud tormide ja nende omaduste statistikat ning päevast käiku.

Võtmesõnad: ilmaradar, polarimeetriline radar, konvektiivne torm, rahe, äike

Sissejuhatus

Konvektiivsed tormid kujutavad endast arvestatavat ohtu, kuna võivad põhjustada laiaulatuslikku kahju nende teele jäävates piirkondades. Üldjuhul on sellised tormid üsna väikeste mõõtmete ja lühikese elueaga. Seetõttu on nende analüüs vaid traditsioonilisi meteoroloogilisi andmeid kasutades keerukas ja siinkohal on suureks abiks erinevad kaugseirevahendid. Maailmas on radareid tarvitatud äikesetormide uuringuteks alates nende kasutuselevõtu algusest (Shackford, 1960). Eestis on ilmaradareid varem rakendatud vaid üksikute tormide analüüsis ja osana modelleerimiskspriimentidest (Toll jt, 2015).

Äikese esinemine konvektiivses tormis sõltub tugevalt konvektiivse raku kõrgusest ja tõusva õhuvoolu tugevusest. Ilmaennustusmudelites on sellega kõige rohkem seotud konvektiivne potentsiaalne energia CAPE (*convective available potential energy*) ja õhu ülesvoolu kiirus. Kummagi kohta neist ei saa piisava lahutusvõimega andmeid ilmateenistuste pakutavatest operatiivsetest lahendustest.

Rahe tekke tõenäosus on suur tormides, kus on tugevad tõusvad õhuvoolud, kõrge allajahutatud vedela vee sisaldus, kõrged pilvetipud ja millel on piisavalt pikk eluiga (Pruppacher ja Klett, 2010; Houze, 2014). Tugevat rahet konvektiivsetes tormides on sageli seostatud kõrge välkude aktiivsusega (Baughman ja Fuquay, 1970).

Välkude detekteerimiseks ja asukoha määramiseks kasutatakse laialdaselt erinevaid välgudetektorite süsteeme, mis võimaldavad välgulöökidest kohta saada kõrge ajalis-ruumilise lahutusega pidevaid andmeid suurtelt maa-aladelt. Paljud pikalainelised välgudetektorite võrgustikud on võimelised registreerima 90–95% pilv-maa-välgulöökidest ruumilise lahutusvõimega 100 m kuni 1 km (Poelman, 2010; Nag jt, 2015).

Ka ilmaradari andmetest on võimalik välke põhjustavaid tormialasid määrata. Välgudetektoritega võrreldes annavad radariandmed lähiprognosile (*nowcasting*) lisaväärtust, kuna nad võimaldavad samm-sammult määrata, millised tormialad kasvavad kiirelt ja on saavutamas äikesetormile omaseid näitajaid. On leitud, et pilv-maa-välkude suur sagedus on seotud radari peegelduvuse maksimaalse kõrguse kiire kasvu perioodiga (Stolzenburg, 1994). Seda parameetrit on mõnes uurimuses täiendatud, otsides teatud peegelduvuse tugevust mingil kindlal temperatuuri kõrguse tasemel (nt Gremillion ja Orville, 1999; Liu jt, 2012). Seoses kaksikpolarimeetriliste radarite levikuga on viimastel aastatel kasutatud äikese ennustamiseks ka polarimeetrilistest andmetest leitud hüdrometeooride esinemist teatud temperatuuri kõrguse tasemetel (nt Wang jt, 2016).

Kui pilv-maa-välke on võimalik määrata suhteliselt kõrge ajalis-ruumilise lahutusega, siis rahe detekteerimine ja asukoha määramine on märgatavalt keerukam ja sageli kasutatakse andmeid eri allikatest, et madalat ajalist ja ruumilist lahutusvõimet parandada. Lisaks ametlike ilmajaamade andmetele on raheuurimustes kasutatud leidnud teated ajalehtedest, uudistest, kindlustusnõuetest ja ohtlike ilmanähtuste arhiividest, nagu ESWD (European Severe Weather Database), TORRO (Tornado and Storm Research Organization) andmebaas või Keraunos (Prantsusmaa). Siiski on puudus laiaulatuslikest ja standardiseeritud operatiivsetest andmetest rahe esinemise kohta jäänud üheks suurimaks takistuseks rahealastes uurimustes (Punge ja Kunz, 2016). Kuna rahe esinemisalad tormides on tavaliselt väga väikesed ja kestuselt lühiajalised, tundub loomulik, et ilmaradari kasutusvõimalusi selles valdkonnas on uuritud pikka aega. Juba Atlas ja Ludlam (1961) näitasid, et radari peegelduvuse väärtused üle teatud läve on seotud rahe esinemisega tormides. Rahe esinemise tõenäosust on võimalik hinnata ka kombineerides radari peegelduvust eri kõrgustel sobivate meteoroloogiliste andmetega, näiteks teatud temperatuuritasemega (nt Waldvogel jt, 1979; Auer, 1994; Holleman, 2001) ja viimastel aastatel ka radariga mõõdetud polarimeetriliste andmetega (nt Ortega jt, 2016).

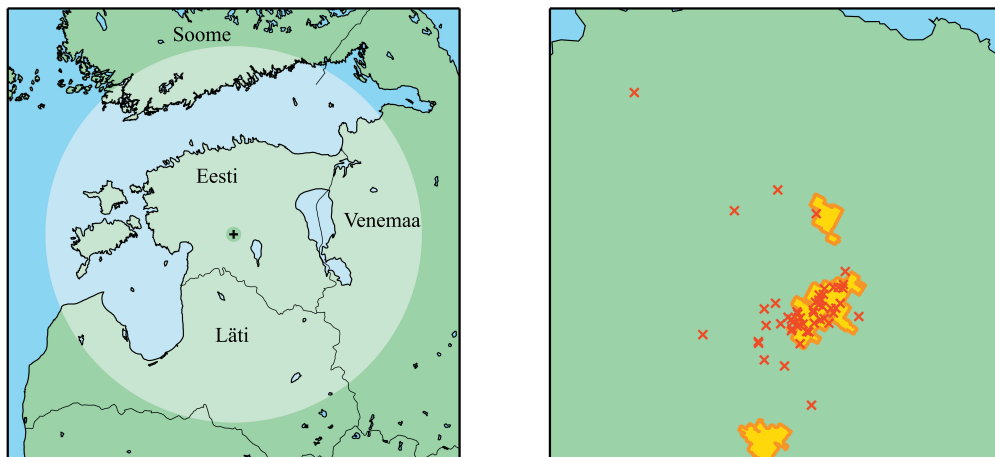
Käesoleva uurimuse eesmärgiks oli leida Eesti ala jaoks parim pilv-maa-välke ennustav parameeter, tuginedes radari, välgudetektorite võrgustiku ja atmosfääri sondeerimise andmetele. Arvutati ka rahe esinemist ennustavaid indikaatoreid ja võrreldi neid kaksikpolarimeetrilise radari andmetest hinnatud rahe esinemisega.

Materjal ja metoodika

Ilmaradari andmed

Töös kasutati Kesk-Eestis Sürgavere külas asuva C-laineala kaksikpolarimeetrilise Doppleri ilmaradari andmeid aastatest 2011–2014. Keskkonnaagentuuri (KAUR) Riigi Ilmateenistuse hallatav ja Vaisala Oy toodetud radar (58,5° N, 25,5° E, 156,5 m ü.m.p) on olnud operatiivses töös alates maikuust 2008. Radari maksimaalne tööraadius on 250 km ja see katab kogu Eesti, osa Lätist, Venemaast ja Lõuna-Soomest (joonis 1). Maksimaalse tööraadiusega skaneeringu intervall on 15 minutit, skaneering kestab 5 minutit ja selle aja jooksul skaneeritakse 8 erinevat kõrgusnurka (0,5°, 1,5°, 3,0°, 5,0°, 7,0°, 9,0°, 11,0° ja 15,0°), alustades madalamast ja liikudes kõrgemale. Kuna maksimaalne tööraadius ja maksimaalne üheselt mõõdetav radiaalne kiirus on omavahel pöördvõrdelises seoses (nn Doppleri dilemma), on radar seadistatud tegema eraldi skaneeringut, mis oleks optimeeritud tuulte andmetele. Selle skaneeringu maksimaalne ulatus on 130 km ja korratakse seda 15 minuti järel, alustades 5 minutit pärast maksimaalse tööraadiusega skaneeringu algust ehk kohe pärast eelmise tsükli lõppu. Käesolevas töös kasutati ainult 250 km raadiusega andmeid, mille lahutusvõime on 300 m radiaalsuunas ja 1° asimuudi suunas. Radarile lähemad kui 10 km andmed jäeti välja, kuna isegi kõrgemate nurkade skaneeringud ei tuvastaks enamikku peegeldustippe, st pilvede tipud jääksid elektromagnetlainete leviku teest kõrgemale.

Lisaks radari peegelduvusele (dBZ) kasutati radariandmetest veel sademeliikide klassifikatsiooni andmeid rahe ja teralume kohta, mis leitakse kaksikpolarimeetriliste andmete põhjal radaritootja algoritmi alusel. Vaisala hüdrometeooride klassifitseerimise algoritm baseerub Liu jt, 2000, Ryzhkov jt, 2005 ja Chandrasekar jt, 2013 töödel.



Joonis 1. Uurimisala (vasakul) ja näide detekteeritud tormialadest koos pilv-maa-välkudega (paremal).

Välgudetektorite andmed

Välgulöökide andmestik, mida töös kasutati, pärineb Põhjamaade välgudetektorite võrgustikust NORDLIS (Nordic Lightning Information System), kuhu kuulub üle 30 Vaisala pikalainelise välgudetektori, mis paiknevad Eestis, Soomes, Norras ja Rootsis. Andmebaasist kasutati ainult pilv-maa-välgulööke nende parema detekteeritavuse tõttu.

Atmosfäärisondeeringud

Raadiosondidega mõõdetud temperatuuri vertikaalse profiili andmeid saadi Harku (KAUR) ja Jokioineni (Soome Meteoroloogia Instituut) jaamade mõõtmistest. Harkus tehakse mõõtmisi kord ööpäevas kell 00.00 UTC ja Jokioinenis kaks korda ööpäevas (00.00 UTC ja 12.00 UTC). Jokioineni mõõtmisi kasutati ainult siis, kui Harku andmed puudusid.

Konvektiivsete tormialade ja teiste radaripõhiste tormikarakteristikute definitsioonid

Konvektiivsete tormide detekteerimiseks ja jälitamiseks leiavad praegusel ajal laialt kasutust pilditöötluse ja arvutinägemise (*computer vision*) meetodid. Tormialaks loetakse alasid, kus madalaima nurgaga skaneeringul jääb radari peegelduvuse väärtus võrdseks või üle 35 dBZ. Valitud läviväärtused jäävad sageli 30–45 dBZ vahele (nt Seroka jt, 2012; Goudenhoofdt ja Delobbe, 2013; Rossi jt, 2014). Kõrgemad väärtused sobivad enam üksikute konvektiivsete tuumade leidmiseks, samas kui madalamad väärtused on paslikumad identifitseerimaks suuremõõtmelisi tormisüsteeme, mis võivad sisaldada mitmeid konvektiivseid tuumasid. Peegeldushäirete eemaldamiseks jäeti välja tormirakud, mis olid väiksemad kui 5 km². Parima välke ennustava parameetri leidmiseks defineeriti mitu tormi omaduse indikaatorit. Arvutatud parameetreid võrreldi ka polarimeetrilistest andmetest saadud raheklassiga, leidmaks neist kõige paremini korreleeruvat. Iga tormiala kohta arvutati järgnevad parameetrid:

1. Maksimaalne peegelduvus – maksimaalne radari peegelduvus madalaimal skaneeringukõrgusel tormialal. Maksimaalne radari peegelduvuse kõrgus, ET (*echo top height*) – maksimaalne kõrgus, kus vastav radari peegelduvuse väärtus tormialas esineb. Peegelduvuse kõrgus on hea konvektsiooni tugevuse näitaja ja kõrgeid peegelduvuse väärtuse lävesid kasutades on leitud selle sobilikkus rahe riski hindamiseks (nt Delobbe ja Holleman, 2006). Võrreldi peegelduvuse kõrgusi 5 dBZ sammuga 0–45 dBZ vahemikus (ET0–ET45), et leida parim läviväärtus.
2. Tormi pindala – leiti iga tormiala pindala väärtus madalaimal skaneeringukõrgusel.
3. Maksimaalne välgulöökide aktiivsus tormis – selle parameetri leidmiseks moodustati uuritaval alal 1x1 km võrgustik. Igas võrgupunktis leiti välgulöökide intensiivus, loendades pilv-maa-välgude arv 10 km raadiuses võrgupunkti keskmest

15 minuti jooksul, alustades 7,5 min enne nominaalset skaneeringu algust. Suurima välgulöökide tihedusega võrgupunkt loeti selle parameetri väärtuseks vastavas tormis.

4. Rahe esinemise suurim kõrgus – polarimeetristest andmetest saadud rahe sademeteklassi maksimaalne kõrgus tormialas.

5. Teralume esinemise suurim kõrgus – polarimeetristest andmetest saadud teralume sademeteklassi maksimaalne kõrgus tormialas.

6. Rahe esinemise tõenäosus, POH (*probability of hail*) – see parameeter põhineb rahe detekteerimise meetodil, mille esmalt esitasid Waldvogel jt (1979). See hindab rahe esinemise riski 45 dBZ peegelduvuse taseme erinevuse põhjal külmumistasemest (0 °C isotherm). Seda täiendati pikaajalise andmehulgaga verifitseerimise järel Hollandi Meteoroloogilises Instituudis ja võeti seejärel seal operatiivsesse kasutusse (Holleman, 2001; Delobbe jt, 2003). Saadi valem, mida on kasutatud ka käesolevas töös:

$$POH = 0.319 + 0.133 \Delta H, \quad (1),$$

kus ΔH (km) on külmumistaseme ja 45 dBZ peegelduvuse taseme kõrguste vahe.

Tulemused ja arutelu

Ülevaade detekteeritud tormidest

Uuritav periood hõlmas sooja aastaaga (mai algusest septembri lõpuni), mil esineb valdav osa Eesti konvektiivsetest tormidest. Vastavalt Mäkelä jt (2014) uurimusele leidis Põhja-Euroopas 99% aastastest pilv-maa-välgulöökidest aastatel 2002–2011 aset sellel perioodil selge maksimumiga juulis (44% välkudest), millele järgnes august (26%).

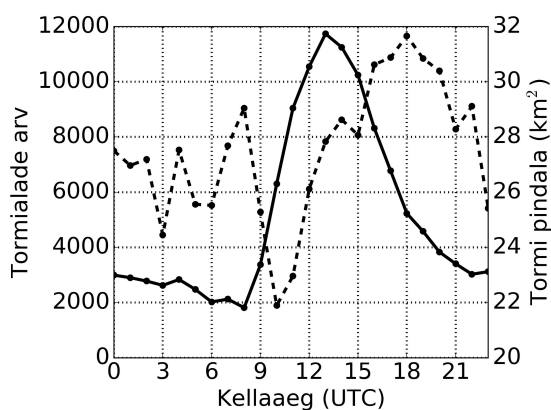
Käesolevas töös identifitseeriti 4-aastase perioodi kohta kokku 123 360 tormiala 195 päeval. Kuna tormialasid ei jälitatud, tasub märkida, et identifitseeritud tormid ei pruugi olla üksteisest sõltumatud, st järjestikustel skaneeringutel asetsevad samad tormid on loetud eraldi tormialadeks. Tormialade arvu päevases jaotuses joonistus selgelt välja miinimum hilisõhtust kuni hommikuni, millele järgnes järsk kasv vahemikus 9.00–13.00 UTC ja langus õhtul (joonis 2). Keskmiselt oli tormialade arv suurim kell 13.00 UTC ehk hilisel pärastlõunal (16.00) kohaliku aja järgi.

Tormide pindalade päevase jaotuse miinimum on kell 10.00 UTC (joonis 2) ehk kohe pärast üksikute tormide arvu kasvu algust. Kõige rohkem üksikuid tormialasid samaaegselt on kell 13.00 UTC. Päeva edenedes isoleeritud tormialad kasvavad ja ühinevad. Seetõttu järgneb miinimumile tormide pindalade kasv päeva jooksul, saavutades maksimumi kell 18.00 UTC.

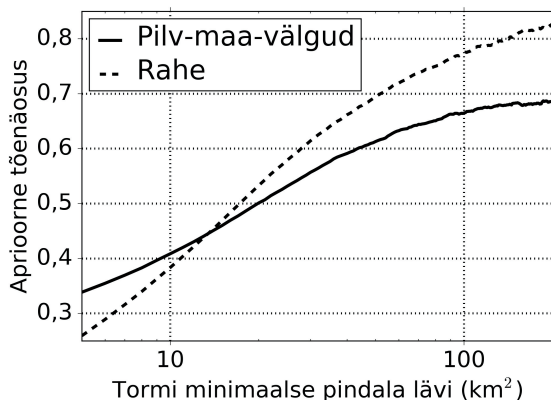
Selleks et leida iga uuritava parameetri potentsiaal äikese või rahe riski indikaatorina, jagati tormialad esmalt nelja klassi: tormid, kus esines pilv-maa-välke (ω_1); tormid, kus ei esinenud pilv-maa-välke (ω_2); tormid, kus esines radari polarimeetristele andmetele tuginedes rahet (ω_3); tormid, kus ei esinenud rahet (ω_4). Pärast

jagamist leiti, et 33,9% tormidest esines pilv-maa-välke ja 25,9% esines rahe. Seega aprioorsed tõenäosused igale klassile olid vastavalt $P(\omega_1) = 0,339$, $P(\omega_2) = 0,661$, $P(\omega_3) = 0,259$ ja $P(\omega_4) = 0,741$.

Aprioorsed tõenäosused sõltuvad olulisel määral mitmetest faktoritest, näiteks tormi klassifikatsiooni definitsioonist, kasutatud andmetest (ka sellest, kuidas on andmehulk selekteeritud, kas juhtumid on valitud käsitsi ja subjektiivselt või suurt andmehulka töödeldes automaatse algoritmiga) ja klimatoloogilistest iseärasustest. Joonis 3 illustreerib, kuidas tormi minimaalse pindala läve muutmine mõjutab äikese ja rahe aprioorseid tõenäosusi. Jooniselt nähtub, et minimaalse pindala läve tõstmisega kaasneb ka aprioorsete tõenäosuste kasv. Seega mida suurema pindalaga on konvektiivne torm, seda suurema tõenäosusega esineb seal ka pilv-maa-välgulööke ja rahe.



Joonis 2. Tormialade jaotuse ööpäevane käik (2011.–2014. a andmed). Tormialade arv (pidevjoon) ja tormi keskmine pindala tunni kohta (katkendlik joon).



Joonis 3. Pilv-maa-välgude ja rahe aprioorsed tõenäosused sõltuvalt tormi minimaalse pindala läve muutusest.

Parima pilv-maa-välke detekteeriva parameetri leidmine

Parima parameetri leidmiseks võrreldi nende kohta arvutatud levinud verifitseerimismõõdikute näitajaid. Iga parameetri kohta arvutati detekteerimise tõenäosus POD (*Probability of Detection*), valehäirete suhe FAR (*False Alarm Ratio*) ja kriitiline eduindeks CSI (*Critical Success Index*), mille valemid on vastavalt

$$POD = \frac{A}{A + C} \quad (2),$$

$$FAR = \frac{B}{A + B} \quad (3),$$

$$CSI = \frac{A}{A + B + C} \quad (4),$$

kus A („täppi“) on välkudega tormialade arv, mis ületavad läve või on sellega võrdsed, B („valehäired“) on välkudeta tormialade arv, mis on üle läve või sellega võrdsed, ja C („möödalasud“) tähistab välkudega tormialade arvu, mis on lävest väiksemad.

POD on mõõdik, mis näitab, kui hästi parameeter suudab teatud sündmust detekteerida. Kuna see võtab arvesse möödalaske, aga mitte valehäireid, on võimalik POD-i skoori parandada (ideaalne skoor on 1), ennustades sündmust sagedamini, mis tähendab jällegi kõrgemat valehäirete suhet. Valehäirete suhe FAR näitab parameetri täpsust ja selle mõõdiku skoori saab parandada, kui sündmust alaennustada ehk antud juhul, mida enam vastava parameetri väärtuste alumises otsas välgulööke esineb, seda madalam on FAR (ideaalne skoor on 0). Kriitilise eduindeksi CSI arvutuses võetakse erinevalt FAR-i ja POD-i arvutusest arvesse nii valehäireid kui ka möödalaske, mis teeb CSI-st tasakaalustatuma mõõdiku, mille ideaalne skoor on 1.

Ilmahoiatuste sooritusvõime võrdluseks verifitseerimismõõdikuid kasutades on levinuim meetod otsida parameetrit, mille CSI skoor on maksimaalne. Kõrgeim CSI skoor 0,390 on ET15-l ja ET20-l (tabel 1). Kuna vastav FAR-i skoor on ET15-l kõrgem, võib sobivaimaks parameetriks lugeda ET20. Kui ET20-st madalama peegelduvuse väärtuse korral on probleemiks kõrge valehäirete suhe, siis ET20-st suuremate peegelduvuse läviväärtuste kasutamise korral väheneb pilv-maa-välke sisaldavate tormide detekteeritavus (madal POD). Näiteks parameetri ET45 korral on ligikaudu 50% tormialadest registreeritud 0 m kõrgusena, mis tähendab, et sellisel hulgal tormides ei ulatunud maksimaalne peegelduvuse väärtus 45 dBZ-ni.

Tabel 1. Parameetrite maksimaalsed CSI ja vastavad FAR-i ning POD-i skoorid pilv-maa-välkude detekteerimiseks.

	CSI	FAR	POD	Parameetri väärtus
Maks. peegelduvus	0,356	0,615	0,800	41,5 dBZ
Tormi pindala	0,353	0,591	0,720	10 km ²
POH	0,340	0,588	0,663	0,03
Rahe kõrgus	0,339	0,661	1,000	0 m
Lumekruubi kõrgus	0,360	0,612	0,832	2400 m
ET0	0,382	0,590	0,846	6200 m
ET5	0,385	0,586	0,846	5900 m
ET10	0,387	0,581	0,833	5700 m
ET15	0,390	0,569	0,806	5400 m
ET20	0,390	0,563	0,783	5000 m
ET25	0,383	0,571	0,779	4300 m
ET30	0,368	0,585	0,763	3600 m
ET35	0,358	0,620	0,856	2500 m
ET40	0,355	0,620	0,845	1600 m
ET45	0,346	0,564	0,626	900 m

Rahe indikaatorite võrdlus

Rahe indikaatoreid võrreldi kaksikpolarimeetrilistel radariandmetel põhineva sademeklassifikaatoriga, et leida sellega kõige paremini ühtivat parameetrit. Kaksikpolarimeetrilistel andmetel põhinev raheandmestik on saadud madalaima kõrgusnurgaga skaneeringust, mis tähendab, et selle kõrgus varieerub mõnesajast meetrist kuni mitme kilomeetrini skaneeringu kaugemas servas. Kuigi rahe esinemine võib olla hinnatud korrektselt, on võimalik, et rahe ei jõua maale, kuna on liiga väike ja võib langemise käigus sulada, või langeb maapinnale teises kohas, kuna on alles kasvamisjärgus ja liigub veel üles-alla. Seega näitab parameetrite võrdlus, milline neist korreleerub kõige paremini rahega, mis on õhus teatud kõrgusel.

Rahe indikaatorite võrdluseks kasutati samu verifitseerimismöödikuid ja sama arvutuskäiku nagu välkude jaoks, vahetades välkudega ja välkudeta tormialade andmed rahega ja raheta tormialade andmete vastu.

Võrreldes pilv-maa-välkudega tormide parameetritega, varieeruvad rahet indikeerivate parameetrite CSI skoorid rohkem, ulatudes 0,294st 0,554ni (tabel 2), välkude puhul 0,339st 0,390ni. Rahe madalamad skoorid on seotud uuritud tormides rahe esinemise madalama aprioorse tõenäosusega ja CSI ulatumist kõrgemate skoorideni võib seostada sellega, et ka mitmed uuritavad parameetrid põhinevad radari andmetel. Parim parameeter CSI skooriga 0,554 läviväärtuse 48 dBZ juures on tormiala maksimaalne peegelduvus, mille FAR-i ja POD-i väärtused on vastavalt 0,352 ja 0,792. Waldvogeli algoritmil põhinev rahe esinemise tõenäosuse

(POH) parameeter, mis on kasutust leidnud mitme riigi ilmateenistuse operatiivtöös, nii häid tulemusi käesolevas uurimuses ei näidanud, andes maksimaalseks CSI väärtuseks 0,469.

Kuigi teiste autorite mitmetes varasemates uuringutes on saadud ka paremaid verifitseerimismöödikute skooore nii välkude kui ka rahe detekteerimiseks, tuleb tõdeda, et need ei ole otseselt võrreldavad meie praeguse tööga. Sageli on parem detekteeritavus saavutatud tänu eelselekteeritud andmetele, võttes arvesse ainult kindlaid tormijuhtumeid. Käesolevas töös kasutatud lähenemine on robustsem ja representatiivsem, kuna statistika põhineb mitmeaastasel eelselekteerimata andme-
hulgal. Seega võib eeldada, et töös leitud parimad parameetrid on efektiivselt kasutatavad Eestis suvisel ajal esinevate konvektiivsete tormide pilv-maa-välkude ja rahe määramiseks. Rahe puhul peab silmas pidama, et meil ei ole võrdluseks kasutada radarist sõltumatuid vaatlusi, sest maapealsete vaatlejate andmeid on liiga hõredalt.

Tabel 2. Parameetrite maksimaalsed CSI ja vastavad FAR-i ning POD-i skoorid rahe detekteerimiseks.

	CSI	FAR	POD	Parameetri väärtus
Maks. peegelduvus	0,554	0,352	0,792	48 dBZ
Tormi pindala	0,419	0,490	0,701	18 km ²
POH	0,469	0,500	0,883	0,12
ET0	0,294	0,652	0,654	7400 m
ET5	0,295	0,661	0,693	6900 m
ET10	0,299	0,657	0,698	6500 m
ET15	0,308	0,635	0,663	6300 m
ET20	0,323	0,612	0,658	5800 m
ET25	0,344	0,578	0,743	5300 m
ET30	0,359	0,559	0,655	4700 m
ET35	0,357	0,582	0,709	3800 m
ET40	0,377	0,555	0,710	3100 m
ET45	0,486	0,475	0,513	1500 m

Tänuavaldused

Käesolevat tööd on toetanud Eesti Teadusfondi uurimisgrant nr 9140 ja Eesti Teadusagentuuri institutsionaalne uurimistoetus IUT20-11.

Viidatud kirjandus

- Atlas, D., Ludlam, F. H. (1961). Multiwavelength radar reflectivity of hailstorms. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 87(374), 523-534.
- Auer Jr, A. H. (1994). Hail recognition through the combined use of radar reflectivity and cloud-top temperatures. *Monthly weather review*, 122(9), 2218-2221.

- Baughman, R. G., Fuquay, D. M. (1970). Hail and lightning occurrence in mountain thunderstorms. *Journal of Applied Meteorology*, 9(4), 657-660.
- Chandrasekar, V., Keränen, R., Lim, S., Moisseev, D. (2013). Recent advances in classification of observations from dual polarization weather radars. *Atmospheric Research*, 119, 97-111.
- Delobbe, L., Holleman I. (2003). Radar-based hail detection: Impact of height assignment errors on the measured vertical profiles of reflectivity. In Preprints 31st Conference on Radar Meteorology, Seattle, WA. American Meteorological Society. 475-478.
- Delobbe, L., Holleman, I. (2006). Uncertainties in radar echo top heights used for hail detection. *Meteorological Applications*, 13(4), 361-374.
- Dotzek, N., Groenemeijer, P., Feuerstein, B., Holzer, A. M. (2009). Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. *Atmospheric research*, 93(1), 575-586.
- Goudenhoofdt, E., Delobbe, L. (2013). Statistical characteristics of convective storms in Belgium derived from volumetric weather radar observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(4), 918-934.
- Gremillion, M. S., Orville, R. E. (1999). Thunderstorm characteristics of cloud-to-ground lightning at the Kennedy Space Center, Florida: A study of lightning initiation signatures as indicated by the WSR-88D. *Weather and Forecasting*, 14(5), 640-649.
- Holleman I. (2001). Hail detection using single-polarization radar. Scientific report WR-2001-01, Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), De Bilt, The Netherlands, 74 pp.
- Houze Jr, R. A. (2014). Cloud dynamics (Vol. 104).
- Liu, H., Chandrasekar, V. (2000). Classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurements: Development of fuzzy logic and neuro-fuzzy systems, and in situ verification. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(2), 140-164.
- Liu, C., Cecil, D. J., Zipser, E. J., Kronfeld, K., Robertson, R. (2012). Relationships between lightning flash rates and radar reflectivity vertical structures in thunderstorms over the tropics and subtropics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D6).
- Mäkelä, A., Enno, S. E., Haapalainen, J. (2014). Nordic lightning information system: thunderstorm climate of Northern Europe for the period 2002–2011. *Atmospheric research*, 139, 46-61.
- Nag, A., Murphy, M. J., Schulz, W., Cummins, K. L. (2015). Lightning locating systems: Insights on characteristics and validation techniques. *Earth and Space Science*, 2(4), 65-93.
- Ortega, K. L., Krause, J. M., Ryzhkov, A. V. (2016). Polarimetric Radar Characteristics of Melting Hail. Part III: Validation of the Algorithm for Hail Size Discrimination. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(4), 829-848.
- Poelman, D. R. (2010). On the Science of Lightning: An Overview. Wetenschappelijke en technische publicatie, (56).

- Pruppacher H. R., Klett J. D. (2010). *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Royal Meteorological Institute of Belgium, Brussels.
- Punge, H. J., Kunz, M. (2016). Hail observations and hailstorm characteristics in Europe: A review. *Atmospheric Research*, 176, 159-184.
- Rossi, P. J., Hasu, V., Koistinen, J., Moisseev, D., Mäkelä, A., Saltikoff, E. (2014). Analysis of a statistically initialized fuzzy logic scheme for classifying the severity of convective storms in Finland. *Meteorological Applications*, 21(3), 656-674.
- Ryzhkov, A. V., Schuur, T. J., Burgess, D. W., Heinselman, P. L. (2005). The Joint Polarization Experiment: Polarimetric rainfall measurements and hydrometeor classification. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(6), 809.
- Seroka, G. N., Orville, R. E., Schumacher, C. (2012). Radar Nowcasting of Total Lightning over the Kennedy Space Center. *Weather and Forecasting*, 27(1), 189-204.
- Shackford, C. R. (1960). Radar indications of a precipitation-lightning relationship in New England thunderstorms. *Journal of Meteorology*, 17(1), 15-19.
- Stolzenburg, M. (1994). Observations of high ground flash densities of positive lightning in summertime thunderstorms. *Monthly weather review*, 122(8), 1740-1750.
- Toll, V., Männik, A., Luhamaa, A., Rööm, R. (2015). Hindcast experiments of the derecho in Estonia on 08 August, 2010: Modelling derecho with NWP model HARMONIE. *Atmospheric Research*, 158, 179-191.
- Waldvogel, A., Federer, B., Grimm, P. (1979). Criteria for the detection of hail cells. *Journal of Applied Meteorology*, 18(12), 1521-1525.
- Wang, J., Zhou, S., Yang, B., Meng, X., Zhou, B. (2016). Nowcasting cloud-to-ground lightning over Nanjing area using S-band dual-polarization Doppler radar. *Atmospheric Research*, 178, 55-64.

Detection of hail and lightning in convective storms by dual-pol Doppler weather radar

Summary

Dual polarimetric Doppler weather radars and long-wave lightning detector networks provide valuable information in the research of convective storms. Automatic storm detection algorithm was used in the study to identify storm areas. Based on Sörgavere radar, NORDLIS lightning detection network and Harku atmospheric sounding data a number of parameters were calculated to find the best estimator for cloud-to-ground (CG) lightning activity in the identified storms in Estonia. The parameters were also compared to hail estimated from polarimetric radar data to find which one correlates with it the best. For lightning estimation the best parameter was echo top height 20 dBZ (CSI = 0.390). Storm cell maximum reflectivity was the best in terms of the highest CSI for hail (CSI = 0.554). The study also includes the diurnal analysis of the detected storms and their statistics.

Tsüanobakterite biomassi hindamine optiliselt keerukast ja madalast siseveekogust MERISE satelliiditulemite põhjal

Silja Pöldma¹, Evelin Kangro², Kersti Kangro²

1 Tartu Ülikool, ökoloogia ja maateaduste instituut, Vanemuise 46, 51014 Tartu

2 Tartu Observatoorium, Observatooriumi 1, Tõravere, Nõo vald, 61602 Tartumaa

Kokkuvõte

Kliima muutumise ja inimtegevuse tagajärjel on siseveekogudes üha enam hakanud levima sellised tsüanobakterid, mis võivad sobivate tingimuste koosmõjul moodustada ulatuslikke ja elusorganismidele ohtlikke õitsenguid. Uuringus kasutati Peipsi järves esinevate tsüanobakterite hindamiseks 2008.–2011. aasta MERISE satelliiditulemeid, mida töödeldi spetsiaalsete algoritmidega (MCI, FLH, MPH). Tulemustest selgus, et enim sobisid tsüanobakterite biomassi hindamiseks FLH produktid ($R^2=0,50$) ning Chl-a kontsentratsiooni väärtuste määramiseks MCI tulemid ($R^2=0,50$). Lisaks uuriti MERISE produktide abil tsüanobakterite ruumilist ja ajalist varieerumist Peipsi järves. Ruumilise analüüsi põhjal eristusid järve osad nii, et madalaimad väärtused pärinesid Suurjärvest ning kõrgemad lõunapoolsetest järveosadest. Tsüanobakterite esinemise kõrgaeg Peipsi järves on juulist septembrini.

Võttesõnad: veekogude kaugseire, satelliitsensor MERIS, tsüanobakterid, klorofüll-a, Peipsi järv, kaugseire algoritmid

Sissejuhatus

Siseveekogudel, eelkõige järvedel, on keskkonnas täita mitmeid rolle. Need on elupaigaks erinevatele liikidele, moodustavad olulise lüli vee-, toiteainete ja süsinikuringes ning pakuvad inimestele mitmeid ökosüsteemi teenuseid, nagu näiteks joogivesi, kalastus ja transport. Samas on siseveekogud inim mõjust ohustatud, mille üheks tagajärjeks võib olla veekogude rikastumine toiteainetega ehk eutrofeerumine (Dörnhöfer ja Oppelt, 2016). Suurenenud toiteainete sisaldus ning soojad ja tuulevaiksed ilmad loovad sobivad tingimused tsüanobakterite arenguks (O’Neil jt, 2012). Tsüanobakterid ehk kõnekeeles sinivetikad on vees laialdaselt levinud mikroorganismide grupp, moodustades ühe osa fütoplanktoni biomassist. Tsüanobakterid mõjutavad veekogude valgustingimusi, hapnikurežiimi ja võivad sisaldada vee-elustikule ja inimestele ohtlikke toksine (Shi jt, 2015). Potentsiaalselt mürgised on ka enamik Peipsis domineerivatest tsüanobakteritest – perekonnad *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon* ja *Gloeotrichia* (Laugaste, Nõges, Tõnno, 2008). Tsüanobakterite mürkide hulka kuuluvad maksa- ja neurotoksiinid, mis võivad põhjustada mitmeid probleeme, nende seas seedetrakti häireid, nahaärritusi, akuutset mürgistust, maksakahjustusi ning ka kasvajate teket (Backer, 2002). Seetõttu on oluline tsüanobaktereid sisaldavate veekogude pidev monitooring.

Teavet veekeskkonna seisundi kohta on võimalik saada traditsiooniliste meetoditega, mis hõlmavad veeproovide kogumist konkreetsetest mõõtmispunktidest ja hilisemat laboratoorset analüüsi. Samas on kontaktmõõtmised aja- ja ressursimahukad ega võimalda hinnata vee kvaliteeti mõjutavaid parameetreid veekogus tervikuna (Li, Li, Song, 2015). Seevastu pakub kaugseire piisava ajalise ja ruumilise lahutusega infot, hindamaks tsüanobakterite levikut. Passiivse kaugseire puhul registreerib satelliidil või kõrgemal platvormil paiknev sensor Päikeselt selleni jõudnud elektromagnetkiirguse. Veekogude seires leiab kasutust peamiselt nähtav ja lähisinfrapunane lainela (390–750 nm). Skaneerimisseadmed ning platvormi enese liikumine muudavad võimalikuks andmete kogumise maakera eri punktidest. Passiivse kaugseire abil informatsiooni hankimist takistavad päeavalguse puudumine ning tihe pilvkate (IOCCG, 2000; Lillesand, Kiefer, Chipman, 2015).

MERIS on veekogude uurimiseks kasutatav harjaskanneri meetodil (ingl *push-broom method*) põhinev spektromeeter (ingl *MEDium Resolution Imaging Spectrometer*), mis mõõtis mööda 800 km kõrgust päikesesünkroonset orbiiti liikuva satelliidi ENVISAT (ingl *ENVironmental SATellite*) pardal maapinnalt lähtuvat päikesekiirgust. Euroopa Kosmoseagentuur (ingl *European Space Agency*, ESA) lennutas satelliidi orbiidile 2002. aastal ning missioon kestis kuni 2012. aasta kevadeni. MERISE 15 spektraalkanalit olid programmeeritavad nii positsioonis kui laiuses, kattes sellega spektrila vahemikus 390–1040 nm. MERISE produktid on kättesaadavad kahesuguse ruumilise lahutusega: 300- (ingl *Full Resolution*, FR) ja 1200-meetrise lahutusega (ingl *Reduced Resolution*, RR). Andmeid eristatakse kuni nelja tulemite tasandina: tasand 0 (*Level 0*, L0), tasand 1 (L1), tasand 2 (L2) ja tasand 3 (L3) (ESA, 2006). Instrumendi kõrge spektraalne ja radiomeetriline resolutsioon võimaldasid seda edukalt rakendada optiliselt keerukate veekogude seireks (Matthews, Bernard, Winter, 2010). Veekogude optilisi omadusi mõjutavad veekeskkonnas olevad või lahustunud ained, mis hajutavad või neelavad veesambasse tunginud kiirgust ning määravad veepinna kohal mõõdetava peegeldusteguri. Tegemist on optiliselt aktiivsete ainetega, mille hulka kuuluvad fütoplankton, tripton ja värvunud lahustunud orgaaniline aine (Bukata, 2005). Tsüanobakterite puhul on peamiseks valgust neelavateks pigmentideks klorofüll-a ning fükotsüaniin (Randolph jt, 2008). MERISE produktidele saab rakendada mitmeid fütoplanktoni pigmendi klorofüll-a tuvastamiseks arendatud algoritme, mis on seeläbi tundlikud ka tsüanobakterite biomassi hulga suhtes.

Materjal ja metoodika

Uuritav veekogu

Peipsi järv on Eesti suurim siseveekogu, asudes kahe riigi, Eesti ning Venemaa piiril. Järv koosneb kolmest osast – eutroofsest Peipsi Suurjärvest, hüpertroofsest Pihkva järvest ning nende vahele jäävast eutroofsest Lämmijärvest (joonis 1) (Nõges jt, 2007). Peipsi järve suubub üle 200 vooluveekogu, millest Emajõgi, Velikaja, Võhandu ja Želtša jõgi moodustavad 80% järve sissevoolust ning reguleerivad seetõttu järve veerežiimi (Jaani, 2001).



Joonis 1. Peipsi järv ja selle osad (Aluskaart: Maa-amet).

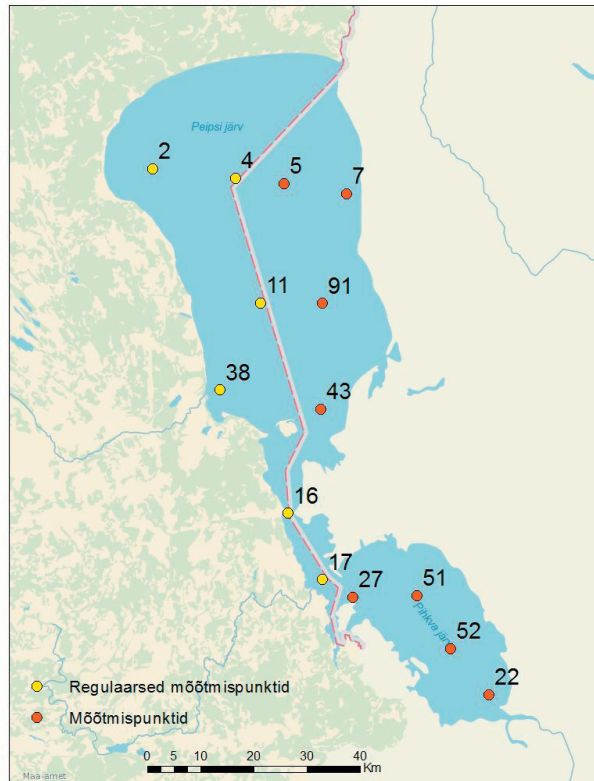
Peipsi järve suubuvaid jõgesid iseloomustavad kõrged toiteainete ja orgaanilise aine kontsentratsioonid. Velikaja ja Emajõe kaudu jõuab veekogusse suurem osa lämmastiku- ja fosforiühendeid (Nõges jt, 2004; Nõges jt, 2007), mille alusel kuulub Peipsi järv kesisesse seisundiklassi (Eesti Keskkonnauuringute Keskus, 2016). Uuritava veekogu ainuke väljavool on Narva jõgi, mille kaudu voolab vesi Soome lahte (Nõges jt, 2007). Peipsi järve morfomeetrilised näitajad on esitatud tabelis 1.

Tabel 1. Peipsi järve morfomeetrilised näitajad
(Jaani, 2001; Laugaste ja Lessok, 2004; Haberman, Timm, Raukas, 2008).

Parameeter	Peipsi järv
Pindala (km ²)	3555
Eesti alal oleva järve pindala (km ²)	1570
Eesti alal oleva järve osakaal (%)	44
Veemaht (km ³)	25,1
Keskmine sügavus (m)	7,1
Maksimaalne sügavus (m)	15,3
Valgala suurus (koos järvega) (km ²)	47 800

***In situ* andmed**

In situ andmetena kasutati fütoplanktoni biomassi (FBM, g/m³), tsüanobakterite biomassi (CY, g/m³) ja klorofüll-a kontsentratsiooni (Chl-a, mg/m³) väärtusi aastatel 2008–2011.



Joonis 2. Peipsi järve mõõtmispunktide asukohad. Kollasega on märgitud igakuised mõõtmispunktid ja oranžiga augustikuu täiendavad proovivõtukohad (Aluskaart: Maa-amet).

Veeproovid on kogutud riikliku keskkonnaseire raames ja laboratoorsed analüüsid on tehtud Eesti Maaülikooli Põllumajandus- ja Keskkonnainstituudi Limnoloogiakeskuses. Veeproovid kogutakse batomeetriga integreerituna eri sügavustelt. Fütoplanktoni biomassi määramiseks kasutatakse Utermöhli (1958) meetodikat, mis põhineb vetikarakkude loendamisel (EMÜ põllumajandus- ja keskkonnainstituut, 2015). Chl-a kontsentratsiooni määramiseks filtreeritakse proov esmalt läbi Whatmani tüüpi GF/F filtri. Pigmentid ekstraheeritakse 96% etanoolis, misjärel analüüsitakse neid spektrofotomeetriliselt (ISO 10260, 1992 (E)). Chl-a kontsentratsiooni arvutamiseks kasutatakse Jeffrey ja Humphrey (1975) võrrandit.

Satelliidiandmed

MERISE andmebaasist (<http://merisfrs-merci-ds.eo.esa.int/merci/queryProducts.do>) laaditi alla 276 täislahutusega (FR) 2008–2011. aasta L1 standardprodukti, millele rakendati esmalt radiomeetrilist korrektsiooni ja naabrusefekti minimeerimiseks ICOL (ingl *Improved Contrast between Land and Ocean*) korrektsiooni. L1 tulemitelt päritud atmosfääri ülapiiri kiirguse väärtustele rakendati MCI ja FLH algoritme. Seejärel töödeldi kõiki L1 pilte MPH protsessoriga, mis nõuab sisendiks spetsiaalse atmosfääri korrektsiooni läbinud tulemeid. Satelliidiandmete töötlemiseks, tulemitelt väärtuste pärimiseks ja tulemite visualiseerimiseks kasutati tarkvara BEAM 5.0 (Brockmann Consult). Kõikide tulemitega viidi enne analüüsi läbi ka kvaliteedikontroll ehk piksliväärtustele rakendati spetsiaalseid kvaliteedimärgendeid. Tulemuste valideerimiseks kasutati *in situ* andmeid. MCI ja FLH indekseid valideeriti *in situ* fütoplanktoni biomassi, tsüanobakterite biomassi ja Chl-a väärtustega ning kuna MPH algoritm väljastab ühe lõpptulemina Chl-a kontsentratsiooni väärtused, kasutati tulemuste võrdlemiseks vaid *in situ* Chl-a väärtusi.

MPH algoritmi arvutamine

MPH arvutamiseks leitakse maksimaalse kõrgusega piigi asukoht MERISE peegeldustegurite kanalites 681, 709 ja 753 nm, mis asuvad punases ja lähisinfrapunases spektrialas. Algoritm arvutab piigi kõrguse lainepikkuste 665 ja 885 nm suhtes (Matthews, Bernard, Robertson, 2012). Muuhulgas on algoritmi üheks väljundiks tsüanobakterite tõenäosuse indeksi (ingl *Immersed Cyanobacteria Index*) produkt (Matthews ja Odermatt, 2015).

MCI ja FLH algoritmide arvutamine

MCI leidmiseks arvutatakse atmosfääri ülapiiri kiirguse väärtuste alusel piigi kõrgus lainepikkusel 709 nm lainepikkuste 681 ja 753 nm suhtes (Alikas, Kangro, Reinart, 2010). MCI arvutamise valem on järgmine (Gower, King, Goncalves, 2008):

$$MCI = L_{709} - 1,005 * [L_{681} + (L_{753} - L_{681}) * ((709 - 681) / (753 - 681))] \quad (1),$$

kus L_x on atmosfääri ülaosa kiirgus vastavatel lainepikkustel. Arv 1,005 on konstant, millega vähendatakse kiudpilvede mõju tulemusele (Palmer jt, 2015a; Palmer jt, 2015b).

FLH algoritmi puhul kasutatakse Chl-a fluorestsentsi, mis avaldub lainepikkusel 681 nm (Xing jt, 2007). Väärtuse saamiseks arvutatakse 681 nm juures asuva piigi kõrgus 665 ja 709 nm suhtes (Gower, Doerffer, Borstad, 1999). FLH arvutamise valem on järgmine:

$$FLH = L_{681} - 1,005 * [L_{665} + (L_{709} - L_{665}) * ((681 - 665) / (709 - 665))] \quad (2).$$

Tulemused ja arutelu

Klorofüll-a määramisel saadi tugevaim seos MCI algoritmiga ($R^2=0,50$; $p<0,05$), millele järgnes FLH ($R^2=0,45$; $p<0,05$). Tsüanobakterite biomassi määramisel saadi tugevaim seos FLH algoritmiga ($R^2=0,50$; $p<0,05$). Kui FLH ja MCI algoritmid on analoogsed (erinedes piigi kõrguse arvutamiseks kasutatavate lainepikkuste ja referentslainepikkuste poolest), siis MPH on mitmeetapiline ning seetõttu keerulisem. Samas oli MPH algoritmi Chl-a väärtuste nelja aasta andmete põhjal saadud seos mõnevõrra nõrgem ($R^2=0,38$; $p<0,05$) kui MCI ja FLH Chl-a seos (tabel 2).

Tabel 2. Satelliiditulemitelt pärinevate väärtuste ja *in situ* mõõtmistulemuste vahelised determinatsioonikordaja väärtused. Paksus kirjas on märgitud tugevaimad seosed ($R^2 \geq 0,50$).

FLH	2008	2009	2010	2011	2008–2011
FBM	0,49	0,58	0,44	0,20	0,37
CY	0,64	0,74	0,49	0,36	0,50
Chl-a	0,49	0,66	0,70	0,19	0,45

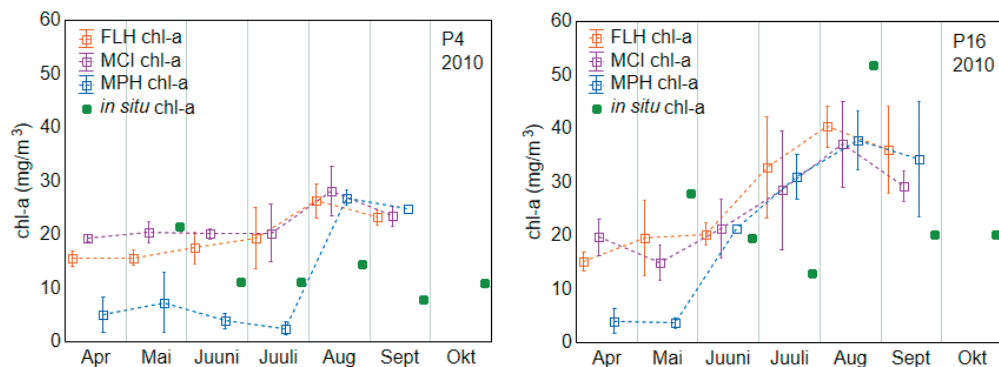
MCI	2008	2009	2010	2011	2008–2011
FBM	0,53	0,54	0,30	0,25	0,33
CY	0,48	0,53	0,31	0,45	0,38
Chl-a	0,51	0,76	0,73	0,14	0,50

MPH	2008	2009	2010	2011	2008–2011
Chl-a	0,22	0,23	0,62	0,54	0,38

Uuringus ei saadud fütoplanktoni biomassi hindamisel MCI ja FLH algoritmidega tugevaid seoseid. Selle üheks põhjuseks võib olla fütoplanktonis kevadel domineerivad ränivetikad, mis sisaldavad lisaks pigmenti karotinoidi (neelab valgust lainepikkuste 440–520 nm vahemikus) (Kirk, 2011). Täpsemaks algoritmide sobivuse hindamiseks kindla vetikaliigi puhul oleks vaja teha liigilise koosseisu analüüs, et tuvastada eri liikide spektraalseid iseärasusi (Alikas, Kangro, Reinart, 2010).

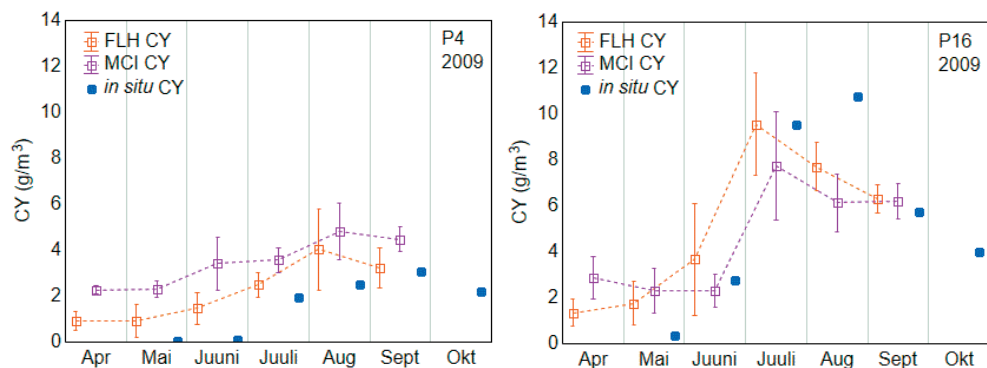
Aegridade põhjal on näha Chl-a väärtuste muutlikkus vegetatsiooniperioodi jooksul. Kevadel pärast lumikatte kadumist on Chl-a kontsentratsioon kõrgem järve lumesulamisveega transporditud toiteainete tõttu. Järgneb juunikuine madala kontsentratsiooni periood ning juulist alates hakkavad Chl-a väärtused vee temperatuuri tõusuga suurenema (EMÜ põllumajandus- ja keskkonnainstituut, 2011). Sarnast muutlikkust järgivad ka algoritmide Chl-a hinnangute väärtused. FLH ja MCI Chl-a väärtused muutuvad vegetatsiooniperioodi lõikes sarnaselt, ülehinnates üldiselt *in situ* Chl-a väärtusi mõlemas Peipsi järve mõõtmispunktis (nr 4 ja nr 16) (joonis 3). Suurem erinevus tekib maksimaalsete *in situ* väärtuste

puhul, mais ja augustis, mil kõik kasutatud algoritmid alahindavad *in situ* väärtusi (v.a august punktis 4). MPH Chl-a väärtused alahindavad mõlemas punktis *in situ* väärtusi vegetatsiooniperioodi esimesel poolel, kuid teisel poolel üldiselt ülehindavad neid.



Joonis 3. FLH, MCI ja MPH algoritmide Chl-a hinnangute võrdlus *in situ* Chl-a väärtustega 2010. aastal kahes Peipsi järve punktis (P4 ja P16). Satelliiditulemite kuukeskmistele väärtustele on lisatud standardhälbed.

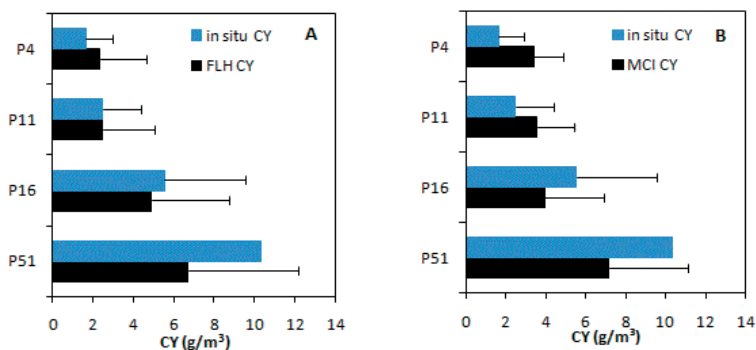
Nii FLH kui ka MCI algoritmid iseloomustavad tsüanobakterite biomassi muutlikkust hästi, järgides vegetatsiooniperioodi jooksul *in situ* väärtustega samsugust trendi. Punktis 4 ülehindavad mõlemad algoritmid tsüanobakterite biomassi väärtusi, MCI rohkem kui FLH. Punktis 16 aga ei saavuta augustis satelliiditulemitelt saadud andmed sama kõrgeid väärtusi võrreldes *in situ* väärtustega (joonis 4).



Joonis 4. FLH ja MCI algoritmide tsüanobakterite biomassi hinnangute võrdlus *in situ* väärtustega 2009. aastal kahes Peipsi järve punktis (P4 ja P16). Satelliiditulemite kuukeskmistele väärtustele on lisatud standardhälbed.

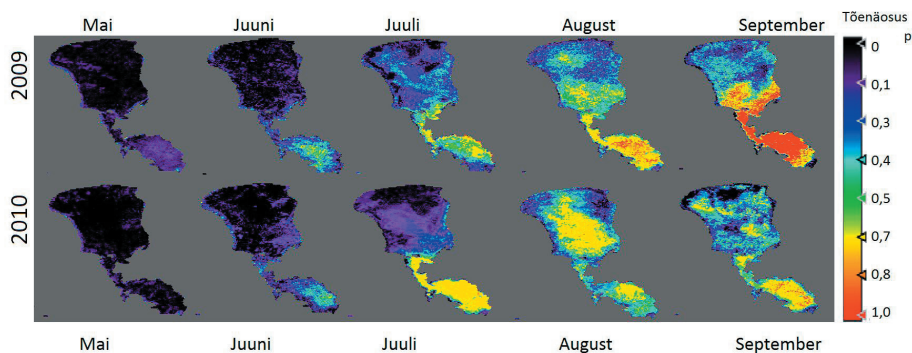
Tsüanobakterite biomassi ruumilise analüüsi põhjal eristuvad selgelt Peipsi Suurjärv (punktid 4 ja 11), Lämmijärv (punkt 16) ja Pihkva järv (punkt 51). Suurjärve mõõtmispunktid on tsüanobakterite esinemise poolest sarnased, siiski on Suurjärve põhjapoolses osas (punkt 4) biomassi väärtused madalamad kui keskosas (punkt 11).

Suurimad biomassi väärtused on saadud Peipsi järve lõunapoolsemates, kõrgema toiteainete sisalduse ning veetemperatuuriga osades, eriti Pihkva järves.



Joonis 5. *In situ* ning FLH (A) ja MCI (B) tulemite tsüanobakterite biomassi väärtuste võrdlus 2009. aastal Peipsi järve neljas punktis (P4, P11, P16 ja P51). Keskmistele väärtustele on lisatud standardhälbed (v.a P51 *in situ* väärtus, kuna mõõtmisi tehti vaid augustis).

2009. ja 2010. aasta MPH tsüanobakterite esinemistõenäosuse kuu-keskmiste produktide põhjal ilmneb tsüanobakterite selge ruumiline ja ajaline varieeruvus (joonis 6). Kevadel on tsüanobakterite esinemise tõenäosus üldiselt madal ning see hakkab tõusma alates juunist esmalt Pihkva järve lõunapoolses osas, juulis on tõenäosus kõrgem ka Lämmijärves. Augustis ja septembris, tsüanobakterite arengutipu ajal, on tõenäosus kõrge üle kogu järve. EMÜ põllumajandus- ja keskkonnainstituudi (2011) andmetel esinesid 2009. aastal tsüanobakterite arenguks soodsamad tingimused, mistõttu oli biomass kõrgem kui 2010. aastal. Aastatevaheline erinevus ilmneb selgesti augusti ja septembri piltide põhjal.



Joonis 6. Tsüanobakterite esinemise tõenäosuse indeks MPH produktidelt 2009. ja 2010. aastal.

Uuringus kasutatud algoritmidest sobisid Peipsi järve tingimustes tsüanobakterite biomassi määramiseks enim FLH ja MCI. Üldiselt võib uuringus saadud tulemuste põhjal väita, et Chl-a sobib tsüanobakterite biomassi iseloomustamiseks Peipsi järves. Aegridade analüüsi põhjal selgus, et FLH ja MCI tsüanobakterite

biomassi ja Chl-a hinnangud järgisid hästi *in situ* väärtuste üldist muutlikkust vegetatsiooniperioodi jooksul. Mõnevõrra tundlikumad olid FLH ja MCI algoritmid tsüanobakterite biomassi muutlikkuse suhtes. Ruumilise varieeruvuse analüüsil eristusid algoritmide ja *in situ* tulemuste põhjal selgesti Peipsi järve eri osad, nii et madalaimad väärtused pärinevad Suurjärvest ning kõrgemad lõunapoolsetest järveosadest.

Tänuavaldused

Autorid avaldavad tänu Eesti Maaülikooli Põllumajandus- ja Keskkonnainstituudi Limnoloogiakeskusele laboratoorsete mõõtmisandmete eest.

Kasutatud allikad

- Alikas, K., Kangro, K., Reinart, A. (2010). Detecting cyanobacterial blooms in large North European lakes using the Maximum Chlorophyll Index. *Oceanologia*, 52, 2, 237-257.
- Backer, L.C. (2002). Cyanobacterial Harmful Algal Blooms (CyanoHABs): Developing a Public Health Response. *Lake and Reservoir Management*, 18, 1, 20-31.
- Bukata, R.P. (2005). Satellite monitoring of inland and coastal water quality: retrospection, introspection, future direction. Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2-5.
- Dörnhöfer, K., Oppelt, N. (2016). Remote sensing for lake research and monitoring – Recent advances. *Ecological Indicators*, 64, 105-122.
- Eesti Keskkonnauuringute Keskus (2016). Peipsi järve hüdrokeemiline seire. Tartu, 9-22.
- EMÜ põllumajandus- ja keskkonnainstituut (2011). Piiriveekogude (Peipsi järv ja Narva veehoidla) hüdrobioloogiline seire ja uuringud 2010. a. Tartu, 20-32.
- EMÜ põllumajandus- ja keskkonnainstituut (2015). Peipsi järve hüdrobioloogiline seire ja uuringud, 9-12.
- ESA (2006). MERIS Product Handbook, 11-42.
- Gower, J.F.R., Doerffer, R., Borstad, G.A. (1999). Interpretation of the 685 nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of fluorescence, absorption and scattering, and its observation by MERIS. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 9, 1771-1786.
- Gower, J.F.R., King, S., Goncalves, P. (2008). Global monitoring of plankton blooms using MERIS MCI. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 21, 6209–6216.
- Haberman, J., Timm, T., Raukas, A. (2008). „Saateks”, raamatust Peipsi, Haberman, J., Timm, T., Raukas, A. (toim.), Eesti Loodusfoto, Tartu, 7-10.
- IOCCG (2000). Remote sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex Waters. Sathyendranath, S. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 3, IOCCG, Dartmouth, 5-46.
- ISO 10260 (1992) (E). Water quality measurements of biochemical parameters – Spectrophotometric determination of chlorophyll-a concentration. Geneva, Switz., 1-6.

- Kirk, J.T.O. (2011). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge University Press, New York, 3-13, 65-90.
- Jaani, A. (2001). "The location, size and general characterization of Lake Peipsi" in *Lake Peipsi – meteorology, hydrology, hydrochemistry*, Nõges, T. (eds.), Sulemees Publishers, Tartu, 10-17.
- Jeffrey, S.W., Humphrey, G.F. (1975). New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 167, 191-194.
- Laugaste, R., Lessok, K. (2004). Planktonic algae and epiphyton of the littoral in Lake Peipsi, Estonia. *Limnologica*, 34, 90-97.
- Laugaste, R., Nõges, T., Tõnno, I. (2008). „Vetikad”, raamatust Peipsi, Haberman, J., Timm, T., Raukas, A. (toim.), Eesti Loodusfoto, Tartu, 251-270.
- Li, L., Li, L., Song, K. (2015). Remote sensing of freshwater cyanobacteria: An extended IOP Inversion Model of Inland Waters (IIMIWI) for partitioning absorption coefficient and estimating phycocyanin. *Remote Sensing of Environment*, 157, 9-23.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman, J.W. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons, Inc. Seventh edition, 1-9.
- Matthews, M.W., Bernard, S., Winter, K. (2010). Remote sensing of cyanobacteria-dominant algal blooms and water quality parameters in Zeekoevlei, a small hypertrophic lake, using MERIS. *Remote Sensing of Environment*, 114, 2070-2087.
- Matthews, M.W., Bernard, S., Robertson, L. (2012). An algorithm for detecting trophic status (chlorophyll-a), cyanobacterial-dominance, surface scums and floating vegetation in inland and coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 124, 637-652.
- Matthews, M.W., Odermatt, D. (2015). Improved algorithm for routine monitoring of cyanobacteria and eutrophication in inland and near-coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 156, 374-382.
- Nõges, T., Tõnno, I., Laugaste, R., Loigu, E., Skakalski, B. (2004). The impact of changes in nutrient loading on cyanobacterial dominance in Lake Peipsi (Estonia/Russia). *Archiv Fur Hydrobiologie*, 160, 2, 261-279.
- Nõges, T., Järvet, A., Kisand, A., Laugaste, R., Loigu, E., Skakalski, B., Nõges, P. (2007). Reaction of large and shallow lakes Peipsi and Võrtsjärv to the changes of nutrient loading. *Hydrobiologia*, 584, 253-264.
- O'Neil, J.M., Davis, T.W., Burford, M.A., Gobler, C.J. (2012). The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful Algae*, 14, 313-334.
- Palmer, S.C.J., Hunter, P.D., Lankester, T., Hubbard, S., Spyarakos, E., Tyler, A.N., Presing, M., Horvath, H., Lamb, A., Balzter, H., Toth, V.K. (2015a). Validation of Envisat MERIS algorithms for chlorophyll retrieval in a large, turbid and optically-complex shallow lake. *Remote Sensing of Environment*, 157, 158-169.

- Palmer, S.C.J., Odermatt, D., Hunter, P.D., Brockmann, C., Presing, M., Balzter, H., Toth, V.R. (2015b). Satellite remote sensing of phytoplankton phenology in Lake Balaton using 10 years of MERIS observations. *Remote Sensing of Environment*, 158, 441-452.
- Randolph, K., Wilson, J., Tedesco, L., Li, L., Pascual, D.L., Soyeux, E. (2008). Hyperspectral remote sensing of cyanobacteria in turbid productive water using optically active pigments, chlorophyll a and phycocyanin. *Remote Sensing of Environment*, 112, 4009-4019.
- Shi, K., Zhang, Y., Li, Y., Li, L., Lv, H., Liu, X. (2015). Remote estimation of cyanobacteria-dominance in inland waters. *Water Research*, 68, 217-226.
- Utermöhl, H. (1958). Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. *Mitteilungen Internationale Vereinigung Theoretische und Angewandte Limnologie*, 9, 1-38.
- Xing, X-G., Zhao, D-Z., Liu, Y-G., Yang, J-H., Xiu, P., Wang, L. (2007). An overview of remote sensing of chlorophyll fluorescence. *Ocean Science Journal*, 42, 1, 49-59.

Detecting cyanobacterial blooms in optically complex and shallow lake using MERIS products

Summary

Rapidly changing climate and increasing anthropogenic impact on inland waters has induced suitable conditions for cyanobacterial blooms. Dominant cyanobacterial species of Estonian Lake Peipsi are potentially toxic, affecting different parts of ecological network. To detect cyanobacterial blooms, different band-ratio algorithms (FLH, MCI, MPH) were applied to MERIS L1 images from the years 2008 to 2011. The products were then validated against in situ measured cyanobacterial biomass, phytoplankton biomass and chlorophyll-a concentration. The results indicated that Chl-a concentration was best described by MCI ($R^2=0,50$) and cyanobacterial biomass was most successfully detected by FLH ($R^2=0,50$) algorithm. MPH algorithm was used to obtain Chl-a concentration ($R^2=0,38$) but the results were not as good as with MCI and FLH products. MCI and FLH followed also temporal and spatial variations of in situ Chl-a and cyanobacterial biomass rather well. All in all, it can be concluded that satellite remote sensing is an effective method for detecting cyanobacterial blooms in optically complex inland water bodies, however, it is also important to use *in situ* data to validate satellite products and to improve remote sensing algorithms.

Eesti ja Euroopa järvede kaldaveetaimestiku, põhiliselt rannaroostike dünaamika Landsati piltide aegreas

Urmas Peterson^{1,2}, Jaan Liira³

1 Tartu Observatoorium, Tõravere, Nõo vald, 61602 Tartumaa

2 Eesti Maaülikool, metsandus- ja maaehitusinstituut, Kreutzwaldi 5, 51014 Tartu

3 Tartu Ülikool, ökoloogia ja maateaduste instituut, Lai 40, 51014 Tartu

Kokkuvõte

Uuringus on koos Eesti järvedega hinnatud valitud Euroopa järvede kaldaveetaimestiku dünaamikat satelliidi Landsat skannerite pildistatud keskmise ruumilise lahutusega piltidelt piksli suurusega 30 m maapinnal. Satelliidipiltidega on esindatud ajavahemik aastast 1985 kuni aastani 2016.

Järvede kaldaveetaimestiku lappide, põhiliselt rannaroostike kaardistamiseks kasutati taimekasvuperioodi teises pooles, juulis ja augustis pildistatud satelliidipilte. Nimetatud ajavahemikus on pilliroo sesoonne vegetatsioonimaksimum, samuti heleduskordaja sesoonne maksimum spektri lähisinfra punases piirkonnas. Roostike dünaamikat on võrreldud järvede kaldajoonest avavee suunas paiknevate suurtaimestiku lappide muutusena aastate jooksul.

Järvede kaldajooned on tuletatud kevadel, aprillis ja mais pildistatud piltidel klassifitseeritud järvede veepeegli-otsuste summeerimise ja „keskmise rannajoone“ leidmisena. Järve keskmine veepeegli pind ja seega ka rannajoon on leitud pikslite kogumina, mis pooltel juhtudel võimalikust korduste arvust esindab veepeeglit. Landsati piltidelt veepeeglipikslite kordustena ilmnevad Euroopa järvede rannajooned jäävad üksteise suhtes sageli ühe, valdavalt kahe piksli laiusesse rannavööndisse.

Suurtaimestikuga alade pindala laienemine Peipsi järves, mis on väldanud viimased paarkümmend aastat, näib olevat viimastel aastatel vähemalt ajutiselt peatunud. Peipsi järve kui terviku suurtaimestikuga lappide trendi mõjutab kaldaveetaimestikuga alade pindala vähenemine viimastel aastatel Pihkva järves. Peipsi Suurjärves suurtaimestikuga alade pindala aeglane suurenemine jätkub.

Võrtsjärves on suurtaimestiku, põhiliselt rannaroostike pindala suurenenud Landsati piltidega kaetud aegrea algusest, aastast 1985 kuni selle sajandi esimese kümnendi keskpaigani. Trend on täheldatav kogu järve rannajoone ulatuses, aga ka siis, kui arvestada üksnes rannaroostikke ja jätta hinnangust välja järve lõunaosa Väikese Emajõe suudmeala ümbrus, kus valdavateks on ujulehtedega taimed.

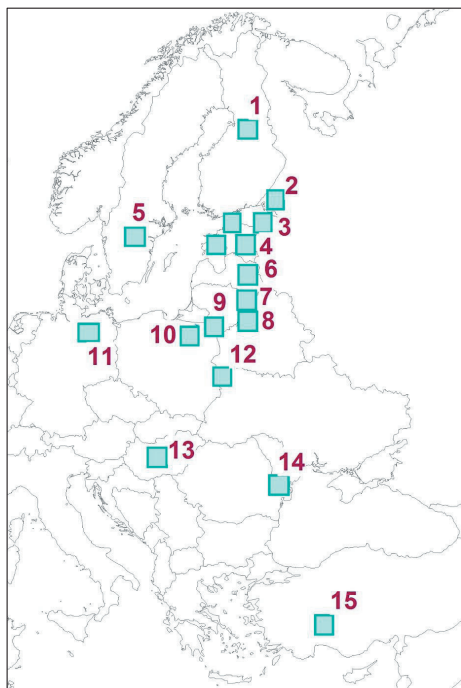
Uuringus vaadeldud Euroopa järvedel on valdavaks tendentsiks sarnaselt Eesti järvedega olnud suurtaimestiku lappide pindala kasv möödunud kümnendi teise pooleni. Seejärel on järgnenud suurtaimestiku lappide pindala vähenemine. Väiksemal osal uuritud Euroopa järvedest on suurtaimestiku lappide pindala vähenenud kogu Landsati piltidega kaetud ajavahemiku kestel, alates 1980. aastate keskpaigast.

Võtmesõnad: Euroopa järved, Landsat TM, Landsat OLI, Peipsi järv, roostikud, Võrtsjärv

Sissejuhatus

Eesti keskkonnaseire programmis aastaid seireobjektideks olnud suurjärvede, valitud väikejärvede ja mereranna suurtaimestiku kaugseirel kasutatud meetodilisi lahendusi (vt Liira jt 2010; Liira ja Peterson 2011) on praeguses uuringus täiendavalt rakendatud valikule Euroopa järvedele – Oulujärvist ($64^{\circ}20'N$ $27^{\circ}15'E$) Soomes põhjas kuni Euroopa lõunaosas paikneva Jalpugi järveni ($45^{\circ}25'N$ $28^{\circ}37'E$) Doonau alamjooksu alal Ukrainas – ning Euroopa naabruses olevate Beyşehir ($37^{\circ}41'N$ $31^{\circ}44'E$) ja Eğirdiri ($38^{\circ}03'N$ $30^{\circ}52'E$) järvedeni Türgis (vt joonis 1). Järvede kaldaveetaimestiku, põhiliselt roostike seireks on kasutatud vabavaraks olevate keskmise ruumilise lahutusega Landsati piltide aegrida. Landsati arhiveeritud pildid on alla laaditud USA Geoloogiateenistuse (U.S. Geological Survey (USGS)) riiklikust satelliidipiltide arhiivist: glovis.usgs.gov. Landsati andmehõive on praeguseks seni viimase, Landsat 8 orbiidile läkitamisega 2013. a kestnud samalaadsete omadustega piltide 30-aastase aegreana. Aegrida jätkub, võimaldades muu hulgas jälgida järvede kaldaveetaimestiku pikaajalist dünaamikat rannaroostike seireks arvestatavas mõõtkavas.

Hinnang valitud Euroopa järvede kaldaveetaimestiku dünaamikale on antud alates 1980. aastate keskpaigast kuni aastani 2016. Kaldaveetaimestiku dünaamikat järvedes on võrreldud järvede rannajoonte suhtes. Järvede rannajooned on tekitatud eri aastate kevadel pildistatud Landsati piltidelt enestelt, kui järved on jääkattest vabanenud, kuid kaldaveetaimestik ei ole nimetamisväärsed alasid veel suutnud katta. See kuu kuni pooleteise pikkune ajavahemik jääb Euroopas märtsi teisest poolest maikuu teise pooleni, olles Euroopa põhjaosa aladel hilisem, lõunaosa aladel varasem. Riikide suuremõõtkavalistel kaartidel kujutatud järvede rannajoonte kasutamisest oleme loobunud põhjusel,



Joonis 1. Uuringus käsitletud järved. Sinised ruudukesed tähistavad igaüks viit kuni kümme-konda järve: 1. Oulujärvi ümbruse järved, Soome; 2. Karjala kannase järved, Venemaa; 3. Ingeri järved, Venemaa; 4. Eesti järved (Peipsi järv, Võrtsjärv, väikejärved); 5. Hjälmareni ümbruse järved, Rootsi; 6. Latgale järved, Läti; 7. Aukštaitija järved, Leedu; 8. Naratši järved, Valgevene; 9. Alytuse järved, Leedu; 10. Masuuria järved, Poola; 11. Mecklenburgi järved, Saksamaa; 12. Šatski järved, Ukraina; 13. Balatoni järv, Ungari; 14. Doonau alamjooksu järved, Ukraina; 15. Eğirdiri ja Beyşehir järved, Türgi.

et kaardistamisel eri riikides on järvede rannajoont defineeritud ilmselt erinevalt. Niisuguseks järeltuseks annavad põhjust vektorkujul rannajoone pealeasetamised Landsati piltidel kujutatud järvedele. Suuremõõtkavalistel kaartidel kujutatud järvede rannajoonte ja satelliidipiltidelt tekitatud järvede rannajoonte vahel on nii kokkulangevusi kui ka asendierinevusi.

Järvede kaldaveetaimestiku aegridade tekitamisel oleme arvestanud suve teises pooles juulis, augustis ja septembri alul pildistatud satelliidipiltidega. Sel ajal on roheliste taimelehtede ja varte katvus pilliroolappidel oma sesoonses arengus suhteliselt stabiilne. Samasse ajavahemikku jääb ka roostike heleduskordaja sesoonne maksimum spektri lähisinfrapunases piirkonnas. Varasuvel pilliroo võrsete ja lehtede katvus suureneb ning selle võrra suureneb ka satelliidipiltidelt klassifitseeritavate pilliroolappide pindala. Hilissuvel, kasvuperioodi lõpu lähenedes septembris, hõrenevad roostikud, muutub kolletavate pilliroolappide heledus ning roostike pind jääb nende servaaladel osaliselt satelliidipiltidel klassifitseerimata. Pilliroo suhteliselt stabiilset perioodi suve teises pooles võib niisugusena nimetada sellele eelneva varasuve perioodi ja järgneva hilissuve perioodiga võrreldes (vt joonis 2).

Valdavalt pilliroo (*Phragmites australis*) roostikega esindatud kaldaveetaimestiku lappide fenoloogilise arengu erinevust maismaakooslustega võrreldes kinnitavad ka meie 2013. a tehtud heleduskordajate mõõtmised Võrtsjärve ääres Rannu-Jõesuus. Heleduskordajate mõõtmised tehti Tartu Observatooriumis konstrueeritud spektri nähtavas ja lähisinfrapunases piirkonnas mõõtva neljakanalilise radiomeetriga. Koos roostikulappidega mõõdeti valikut rannikuala taimekooslusi sagedusega keskmiselt kord nädalas (vt joonis 3). Mõõtmistel kasutatud radiomeeter on spektri optilises piirkonnas mõõtvate satelliidiskannerite, sealhulgas ka Landsat-satelliitide skanneerite spektraalne analoog. Joonisel 3 kujutatud heleduskordajate sesoonsete aegridade saamisloo selgituseks olgu siinjuures lisatud, et mõõtmised seisnesid radiomeetriga mõõtmistes valitud koosluste kümnes erinevas paigas. Iga üksikmõõtmisega keskmistati kuuskümmend radiomeetri lugemit. Mõõtmised tehti kahe tunni kestel arvates kohalikust keskpäevast. Jooniselt nähtub, et valdavalt pilliroost koosnevate roostike sesoonne vegetatsioonimaksimum, samuti heleduskordaja sesoonne maksimum spektri lähisinfrapunases piirkonnas on suve teises pooles, juuli lõpus või augustis, erinevalt maismaakooslustest, mille sesoonne vegetatsioonimaksimum on juunis. Nimetatud asjaolu suunab roostike kaardistamise otstarbekuse tähelepanu suve teise poolde.

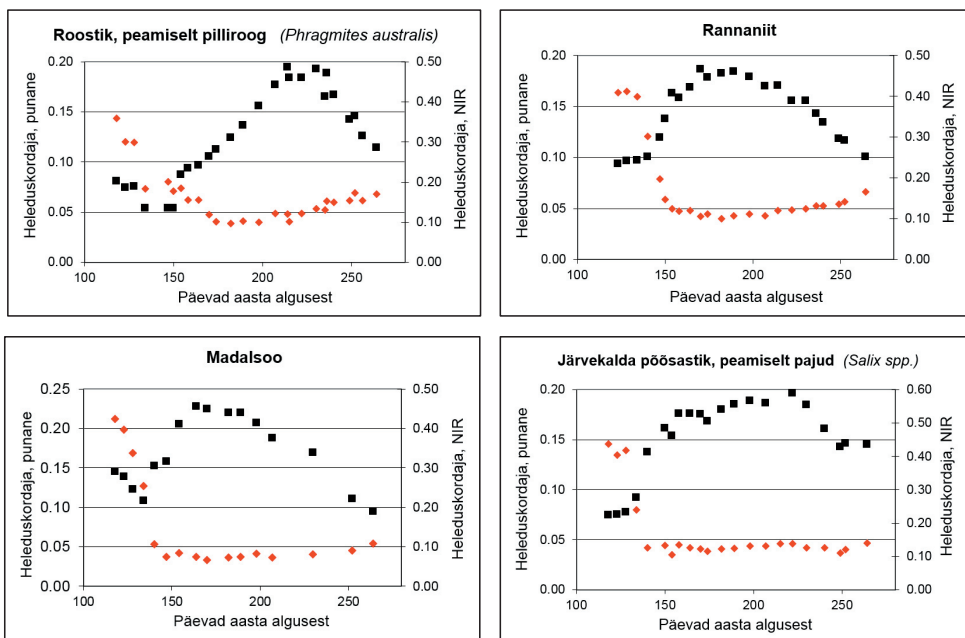
Metoodika

Järvede kaldaveetaimestiku, põhiliselt roostike kaardistamiseks kasutati uuringus aastate 1985 kuni 2016 suve teises pooles pildistatud spektri punase ja lähisinfrapunase spektripiirkonna piltidest arvutatud vegetatsiooniindeksi NDVI (ingl k *Normalized Difference Vegetation Index*) pilte. Suve teises pooles on pilliroo vegetatsioonimaksimum, mil pilliroog on sesoonselt kõige lopsakam ning roostikupiiri eristamistäpsus keskmise ruumilise lahutusega satelliidipiltidelt seetõttu põhimõtteliselt kõige suurem.

Roostike kaardistamiseks kasutati Landsat-seeria satelliitide skannerite Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) ja Operational Land Imager (OLI) pilte pikslisuurusega 30 m maapinnal. Tõsiselt võetavat alternatiivi kaugseirepiltidele juba möödunud suvede roostike kaardistamiseks õieti polegi.



Joonis 2. Roostikud, pildidel rannalähedase vööndina pajupõõsastest Võrtsjärve avavee suunas, alustavad taimekasvuperioodi maismaakooslustest mõnevõrra hiljem. Rohelised võrsed ulatuvad eelmise aasta koltunud vartest kõrgemale mai lõpus ja juuni alguses. Lühemat aega mai lõpus on roostikud maismaakooslustest eristatavad, kui maismaakooslused on juba rohelised, roostikud veel mitte. Juulis ja augustis on nii roostikud kui ka maismaakooslused rohelised. Septembri kestel lõpetavad roostikud taimekasvuperioodi ja kolletavad samaaegselt maismaakooslustega. Pildid on pildistatud 2013. a suvel Rannu-Jõesuu vaatetornist.



Joonis 3. Heleduskordajate sesoonseid käigud spektri punases (punased punktid) ning lähisinfrapunases piirkonnas (mustad punktid). Joonisel on näidatud 2013. a taimekasvuperioodil Rannu-Jõesuus valitud kooslustes neljakanalilise radiomeetriga mõõdetud heleduskordajate maapealsete mõõtmiste tulemused. Iga punkt joonisel esindab kümnes paigas mõõdetud heleduskordajate keskmist väärtust. Pilliroo sesoonne vegetatsioonimaksimum, samuti heleduskordaja sesoonne maksimum spektri lähisinfrapunases piirkonnas on suve teises pooles, juuli lõpus või augustis, erinevalt maismaakooslustest, mille sesoonne vegetatsioonimaksimum on juunis. Niisugused erinevused sesoonsetes heleduskäikudes toetavad pilliroostike eristamist teistest taimekooslustest kaugseirepiltidel. Radiomeetri spektraalse tundlikkuse piirkonnad sarnanevad satelliidi Landsat skannerite punase ja lähisinfrapunase kanali spektraalse tundlikkuse piirkondadega.

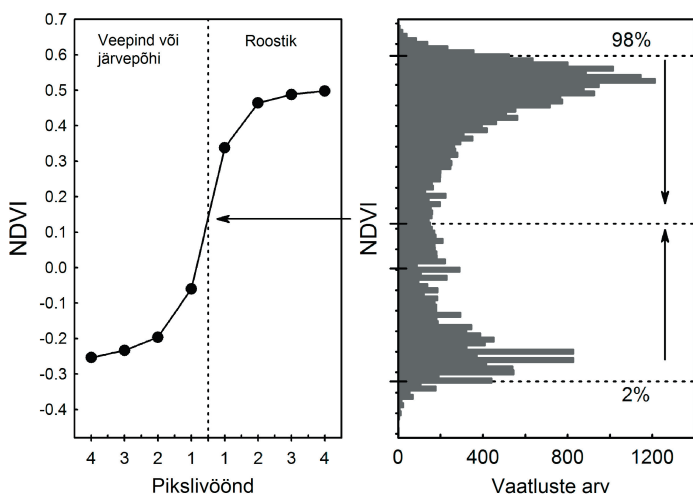
Landsat-satelliitide skannerid (TM jt) on kavandatud eeskätt maismaa kaugseireks, kuid järvede ja rannikumere veepind ühelt poolt ning kaldaveetaimestiku taimkattega alad teiselt poolt on ka Landsat TMi mõõdetavates spektripiirkondades piisavalt suure heleduse erinevusega, et maapinnal 30-meetrise pikslisuurusega pildidel roostikuala ning avaveeala teineteisest eristada. Roostike seirel on roostike piiri eristamine tehtud Landsat TMi spektri punase ja lähisinfrapunase piirkonna satelliidipiltidest teisendatud ja maismaa kaugseires end õigustanud vegetatsiooniindeksi NDVI piltidelt. Indeksi arvutamise eeskirjas

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$$

arvestatakse spektri punase (R (ingl k *red*)) ja lähisinfrapunase (NIR (ingl k *Near Infrared*)) piirkonna heledust. Taimkatteta pinna (praegusel juhul veepind ning rannavööndi liiva- ja kruusapind) heledus neis kahes spektripiirkonnas erineb vähe, seega on väikesed ka nende pindade NDVI väärtused. Taimedega kaetud pindade

(praegusel juhul kaldaveetaimestiku) heleduse erinevus neis spektripiirkondades on suur, seega on suured ka nende pindade vegetatsiooniindeksi NDVI väärtused. Neis suvepoolaastal pildistatud satelliidipiltide pildivälja osades, kus on üheaegselt nii taimestunud kui ka taimestumata pindasid – nii on see veekogude rannalähedases vööndis –, on ka taimkatteindeksil NDVI bimodaalne jaotus. Joonisel 4 on näidatud NDVI sagedusjaotus Võrtsjärve 200-meetrises rannalähedases vööndis hilissuvel, 9. augustil 2007 pildistatud satelliidipildil. Pikslite NDVI väärtused moodustavad samasuguse sadulakujulise tihedusjaotuse, nagu võib muuseas näha talvistel pildidel, kus on suure heledusega lagedad alad ning tumedad metsaalad.

Kahte tüüpi objektide (praegusel juhul 1. rannaroostikud ning 2. veepind või madalveega paljandunud järvepõhi) mõõdetud heleduste jaotuste segu klassifitseerimisel kaheks klassiks võib rakendada erinevaid meetodeid. Enamik neist nõuab eelduste tegemist tunnuste väärtuste jaotuse ning parameetrite kohta. Veekogude kaldavööndi andmestik iseloomustab olukorda, kus eeldusi teha ei ole kerge. Kaugseirepildil esindatud kahe klassi omavaheline ohtrussuhe sõltub taimkatte struktuurist, samuti mõjutavad jaotuste hajuvust vaatlus- ja valgustustingimused, sealhulgas eriti atmosfääri aerosoolide ja veeauru sisaldus.



Joonis 4. Näide vegetatsiooniindeksi NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) piksliväärtuste sagedusjaotusest Võrtsjärve rannajoonest 200 meetri laiuses vööndis avavee suunas. Arvestatud on pikslid järve kogu rannajoone ulatuses. Joonisel on kujutatud 9. augustil 2007 pildistatud satelliidipildi pikslite sagedusjaotust. Väikeste, sealhulgas ka negatiivsete väärtustega pikslid esindavad veepinda ning madalveega paljandunud järvepõhja, suurte NDVI väärtustega pikslid esindavad kaldaveetaimestikku. Roostiku klassifitseerimisel on eristuspiir leitud 2 ja 98 protsendi protsentiilväärtuste järgi. Roostiku eristuspiir jääb avavee ja kaldaveetaimestiku üleminekualal suurima NDVI gradiendiga lõigule. Joonisel on näidatud nelja pikslivööndi NDVI väärtuste keskvväärtused roostikupiirist mõlemas suunas järve kogu rannajoone ulatuses (Liira jt 2010).

Neil põhjustel on klassifitseerimisvigade kontrolli all hoidmiseks mõistlik rakendada võimalikult lihtsat parameetrivaba klassifitseerimistehnikat. Suurtaimestiku klassifitseerimisel on kasutatud kahte eeldust: 1) mõlema seisundi tegelik väärtus asub võrdsel kaugusel seisundite väärtuste segu sisaldavast sagedusjaotuse sadula keskosast; 2) jaotuse äärmisi väärtusi (st jaotuse „sabade“ ekstremumite piirkonda) mõjutavad pigem vaatlus- ja valgustustingimused ehk nn müra ja vähem objektide eneste omadused. Nendest eeldustest lähtudes on aluspinnaobjekte endid esindav väärtuste tegelik vahemik ja vahemiku keskpunkt määratletavad väärtuste enamuse jaotumisega arvteljel. Jaotuste keskpunkti määratlemist kõiki pildivälja piksliväärtusi arvestades mõjutab eelkõige jaotuse „sabadesse“ kogunenud infomüra ning „sabaväärtuse pügamine“ lubab ülejäänud väärtuste vahemiku jagada kahte klassi, mis vastaksid vaadeldavate objektide kahele seisundile. Jagamine toimub korregeeritud otspunktide vahelise keskpunkti alusel.

Jaotuse „sabadesse“ kogunenud infomürast oleks võimalik vabaneda protsentiilide määratlemisega. Kuna satelliidipilt sisaldab väga suurel hulgal piksleid ja seega ka nendel mõõdetud väärtuseid (keskmise ruumilise lahutusega satelliidipildil on kümneid miljoneid piksleid), siis peaks tulemus olema suhteliselt stabiilne juba väga väikeste protsentiilide eemaldamisega „sabadest“. Näiteks võib ka antud juhul rakendada ökoloogias statistiliste testide hüpoteeside hindamiseks kasutatava 5% vea põhimõtet. Mõningase katsetamise tulemusena on selgunud, et optimaalseteks protsentiilideks sobivad väga hästi 2 ja 98. Ka 5. ja 95. protsentiili rakendamine annab analoogse tulemuse 2. ja 98. protsentiiliga lahendile, v.a väga kontrastse pildi puhul, kus üks või mõlemad „küürud“ (moodide kogumid) võivad sattuda piirväärtusele liialt lähedale ja põhjustada keskpunkti nihet. Seega tugineb edasine klassifitseerimisotsus pildi piksliväärtuse lävendiga klassifitseerimisele, kusjuures eristuspiir hinnatakse piksliväärtuste sagedusjaotuse 2. ja 98. protsentiili kesk- väärtusena.

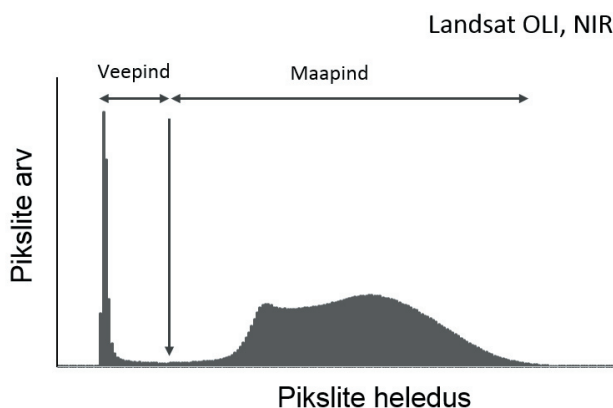
Eri aastate eri suvekuudel pildistatud piltidest pindalahinnangute mitmeaastast aegrida moodustades lisandub andmete hajuvusse veetaimestiku fenoloogilisest muutlikkusest põhjustatud variatsioon. Euroopa eri piirkondade järvede alade heakvaliteedilisi, vähese pilvisusega oludes pildistatud satelliidipilte on uuringus aegridade moodustamiseks kasutatud 20 kuni 30. Pildid katavad ajavahemikku aastast 1985 kuni aastani 2016.

Klassifitseerimisotsusega tekkivat roostikupiiri on võrreldud maapealsete GPS-mõõtmistega tekitatud roostikupiiriga Eesti järvedel ning roostikupiiriga suure ruumilise lahutusega satelliidipildidel Euroopa järvedel.

Järvede kaldaveetaimestiku lappidena on satelliidipiltide pilditöötluses käsitletud järvede rannajoonest avavee suunas jäävaid suurtaimestikuga taimestunud alasid.

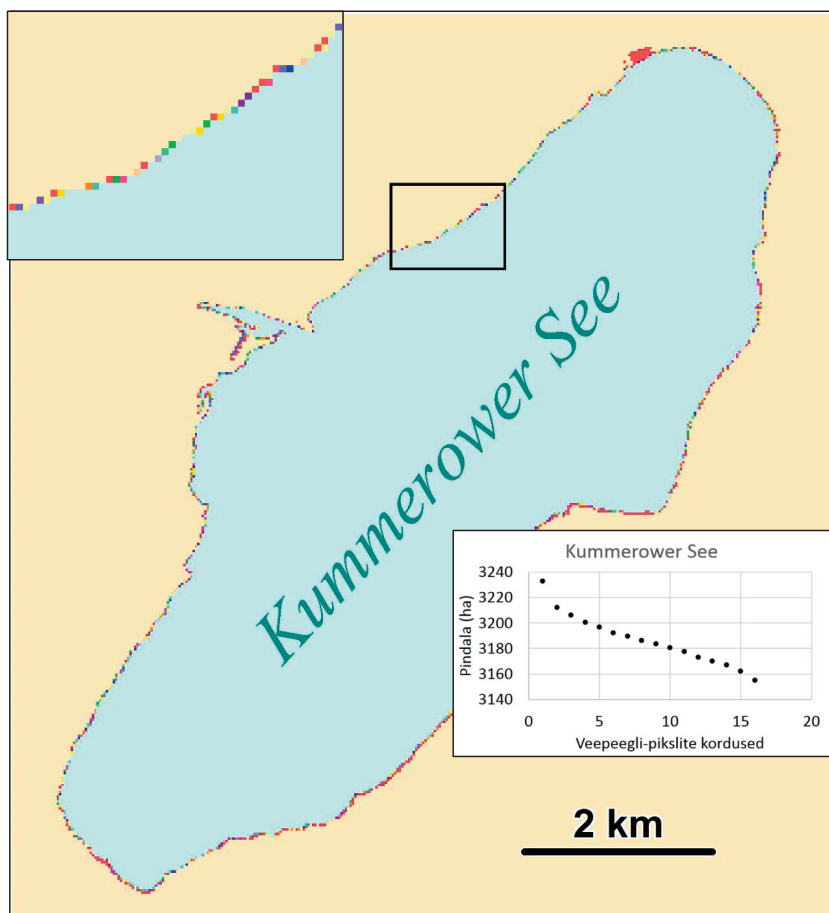
Rannajoone tekitamiseks kasutati eri aastate kevadel pildistatud pilte ajavahemikust, mil talvine jääkate on juba sulanud, kuid suvine veetaimestik ei ole veel nimetamisväärselt kasvuperioodi alustanud. Ajavahemik on niisiis aprilli teisest poolest maikuu teise pooleni.

Veepinna ja maismaa-alade heleduse erinevus on spektri lähisinfrapunases piirkonnas suur. Üks viise kaugseirepiltidel veekogude eristamiseks, nii ka praeguses töös, on sagedusjaotuses eristuspiiri seadmine vett ja maismaad esindavate pikslite „sadulaosa“ keskele, kasutades spektri lähisinfrapunases piirkonnas pildistatud satelliidipilte (vt joonis 5). Märkusena olgu lisatud, et pikslid sagedusjaotuse madalas sadulaosas on kahte klassi esindavad segupikslid. Kirjeldatud viisil tekib ühel satelliidipildil olevat situatsiooni, eelkõige veetaseme kõrgust järves arvestav järve kaart koos järve kaldajoonega. Roostikulappide kaardistamisel on arvestatud järvede „keskmist kaldajoont“.



Joonis 5. Pikslite heleduse sagedusjaotus satelliidi Landsat skanneri Operational Land Imager (OLI) pildil spektri lähisinfrapunases piirkonnas (OLI 5, lainepikkustel 0,845–0,885 μm) Aukštaitija järvede alal Leedus 13. mail 2016. Veepinna ja maismaa-alade heleduse erinevus on spektri lähisinfrapunases piirkonnas suur. Üks viise kaugseirepiltidel veekogude eristamiseks, nii ka praeguses töös, on sagedusjaotuses eristuspiiri seadmine vett ja maismaad esindavate pikslite „sadulaosa“ keskele. Pikslid sagedusjaotuse madalas sadulaosas on kahte klassi esindavad segupikslid.

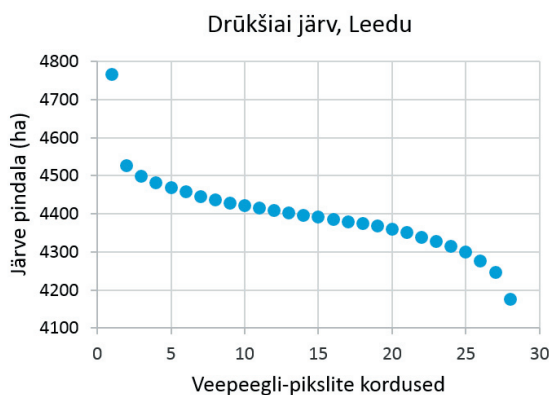
Järvede „keskmised kaldajooned“ on tuletatud kevadistel piltidel klassifitseeritud järvede veepeegli-otsuste summeerimisena. Järve keskmine veepeegli pind ja seega ka rannajoon on leitud pikslite kogumina, mis pooltel juhtudel võimalikust korduste arvust esindab veepeeglit. Landsati piltidelt veepeeglipikslite kordustena ilmnevad järvede rannajooned jäävad üksteise suhtes sageli ühe valdavalt kahe piksli laiusesse rannavööndisse. Summeeritud piltidel esindab suurim piksliväärtus ala järvel, kus kõigil piltidel on piksel klassifitseeritud veepeegliks. Piksliväärtus 1 esindab ala, kus vaid ühel piltidest on piksel klassifitseeritud veepeegliks. Summeeritud piltidel on veepeeglipikslite kordusi piltide aegreas eri Euroopa järvede piltide arvust olenevalt 15 kuni 30. Piisavalt suur piltide hulk arhiivis võimaldab tekitada representatiivse järve veepeegli hinnangu (vt joonis 6).



Joonis 6. Järvede kaldajoone-otsused on tuletatud kevadistel piltidel klassifitseeritud järvede veepeegli-otsuste summeerimisena. Mecklenburgi järvede alal paikneva Kummerowi järve rannajoone tekitamiseks on pilte olnud 16. Summeeritud piltidel esindab suurim piksliväärtus ala, kus kõigil piltidel on piksel klassifitseeritud veepeegliks. Piksliväärtus 1 esindab ala, kus vaid ühel piltidest on piksel klassifitseeritud veepeegliks. Järve keskmine veepeegli pind ja seega ka rannajoon on leitud pikslite kogumina, mis pooltel juhtudel võimalikust korduste arvust esindab veepeeglit. Landsati piltidelt veepeeglipikslite kordustena ilmnevad järvede rannajooned jäävad üksteise suhtes sageli ühe, valdavalt kahe piksli laiusesse rannavööndisse (vt detail järve rannajoonest joonisel). Harvade (ühekordsete) üleujutus-alade pindala ei ole suur.

Tulemused ja arutelu

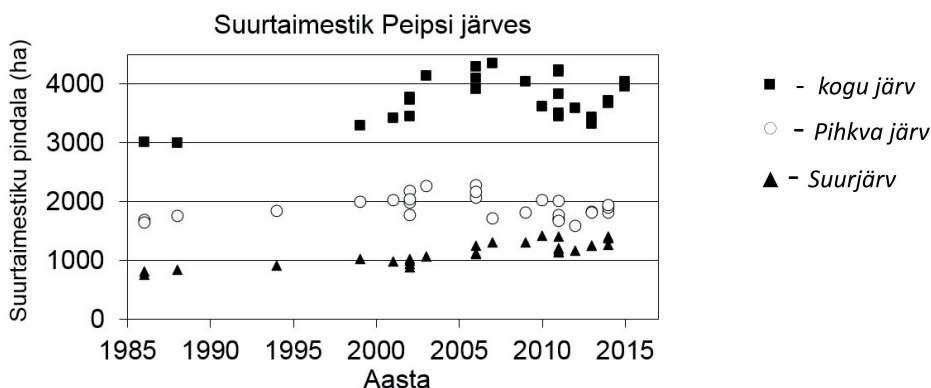
Järvede rannajoone leidmisel summeeritud kevadiste veepeeglipiltide keskmise veepeeglikordusega piksliväärtusena on harvade kõrgveeseisude ja harvade madalveeseisude mõju keskmisele järve veepegli pindalahinnangule ja seega keskmisele rannajoone asendile tühine. Küllalt suure kevadiste piltide arvu korral on kasutatud piltide hulga muutusel rannajoone keskmise asendi muutusele väike mõju. Joonisel 7 kujutatud, Leedu ja Valgevene piirialal Aukštaitija kõrgustikul paikneva Drūkšiai järve rannajoone kaardistamiseks on kasutatud 28 pilti. Järve veepegli keskmine pind on leitud pikslite kogumina, mis 14 juhul esindavad veepegli. Nimetatud otsusest kahe-kolme korduse võrra erinevad otsused mõlemas suunas tingivad järve pinna „keskmise olukorraga“ võrreldes suurusjärgus 1% võrra erineva otsuse.



Joonis 7. Järvede rannajoone leidmisel summeeritud kevadiste veepeeglipiltide keskmise veepeeglikordusega piksliväärtusena on harvade kõrgveeseisude ja harvade madalveeseisude mõju keskmisele järve veepegli pindalahinnangule ja seega keskmisele rannajoone asendile tühine. Küllalt suure kevadiste piltide arvu korral on kasutatud piltide hulga muutusel rannajoone asendi muutusele väike mõju. Joonisel kujutatud Drūkšiai järve (Aukštaitija kõrgustikul Leedus) rannajoone kaardistamiseks on kasutatud 28 pilti. Järve veepegli keskmine pind on leitud pikslite kogumina, mis 14 juhul esindavad veepegli.

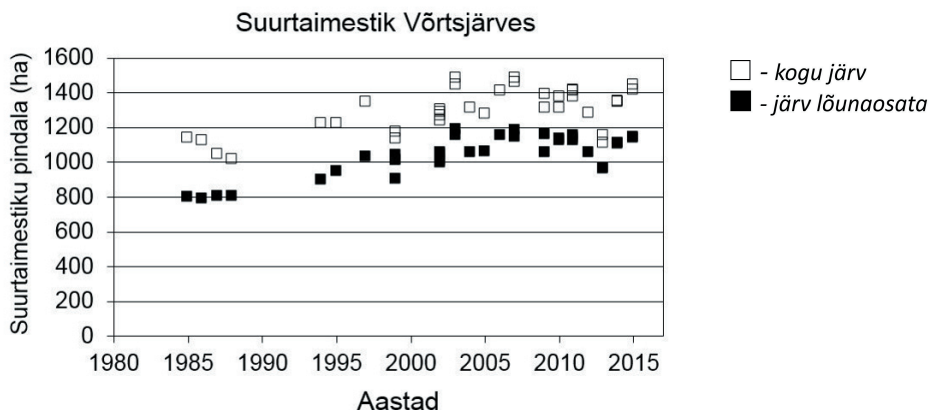
Eri aastate kevadatel pildistatud piltide liitmisest ilmneb, et tulemusena tekkivad järvede kaardid, st rannajoonte asendid kaartidel, on küllalt stabiilsed ning sellistena roostikulappide pindalahinnangutel, lähtudes lappide asendist rannajoone suhtes, arvestatavad.

Uuringu tulemustest nähtub, et Eesti suurimas, Peipsi järves, mis on ka piirijärveks Venemaaga, suurtaimestikuga alade pindala laienemine, mis on väldanud viimased paarkümmend aastat, näib olevat viimastel aastatel vähemalt ajutiselt peatunud. Peipsi järve kui terviku suurtaimestikuga lappide trendi mõjutab kaldaveetaimestikuga alade pindala vähenemine viimastel aastatel Pihkva järves. Peipsi Suurjärves suurtaimestikuga alade pindala aeglane suurenemine jätkub (vt joonis 8).



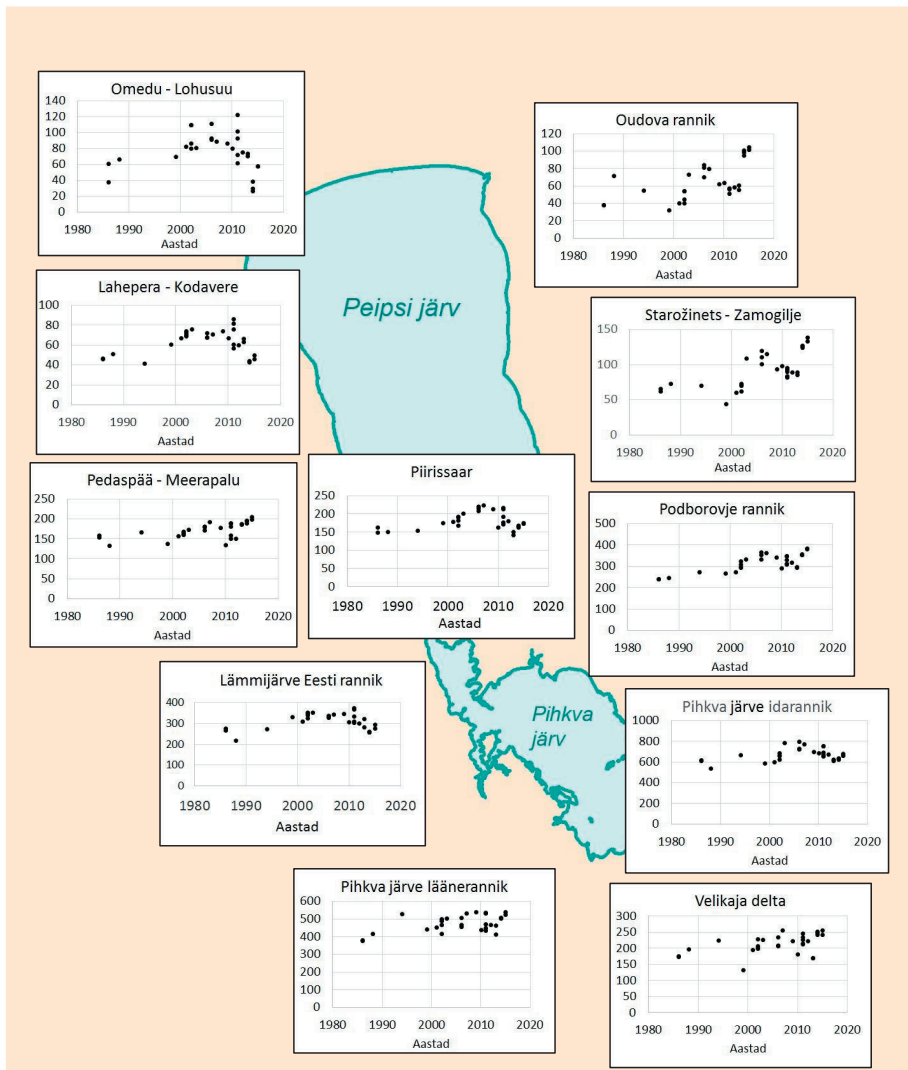
Joonis 8. Suurtaimestikuga alade pindala laienemine Peipsi järves, mis on väldanud viimased paarkümmend aastat, näib olevat viimastel aastatel vähemalt ajutiselt peatunud. Peipsi järve kui terviku suurtaimestikuga lappide trendi mõjutab kaldaveetaimestikuga alade pindala vähenemine viimastel aastatel Pihkva järves. Peipsi Suurjärves suurtaimestikuga alade pindala aeglane suurenemine jätkub.

Madalaveelises Võrtsjärves on suurtaimestiku, põhiliselt rannaroostike pindala suurenenud Landsati piltidega kaetud aegrea algusest, aastast 1985 kuni selle sajandi esimese kümnendi keskpaigani. Tendents on täheldatav nii kogu järve rannajoone ulatuses, aga ka siis, kui pidada silmas üksnes rannaroostikke ja jätta hinnangust välja järve lõunasopp Väikese Emajõe suudme ümbruses, kus valdavateks on ujulehtedega taimed vesikupud ja vesiroosid (vt joonis 9).



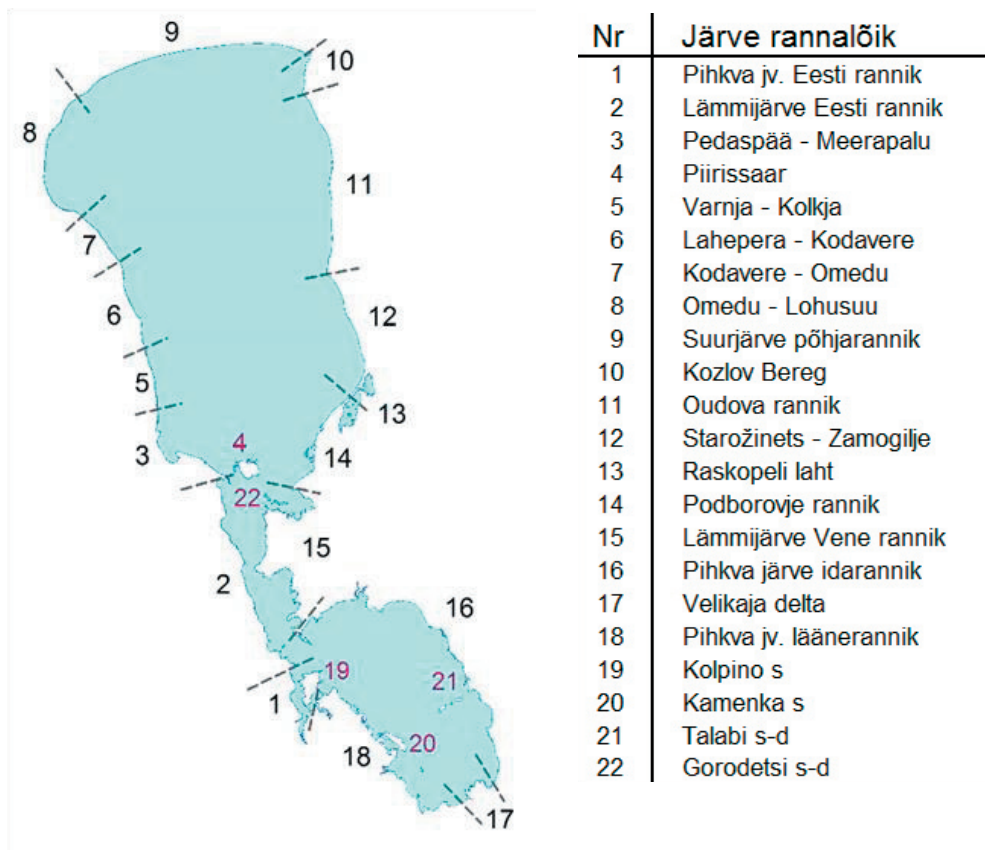
Joonis 9. Võrtsjärves on suurtaimestiku, põhiliselt rannaroostike pindala suurenenud Landsati piltidega kaetud aegrea algusest, aastast 1985 kuni selle sajandi esimese kümnendi keskpaigani. Nii on see olnud kogu järve rannajoone ulatuses, aga ka siis, kui arvestada üksnes rannaroostikke ja jätta hinnangust välja järve lõunasopp Väikese Emajõe suudme ümbruses, kus valdavateks on ujulehtedega taimed.

Pihkva ja Lämmijärve nii Eesti- kui ka Venemaa-poolsetel rannikutel ning järve saartel on rannaroostike lappide pindala kõrgaeg olnud valdavalt eelmise aastakümne keskpaigas, aastatel 2005 kuni 2007 (vt joonis 10).



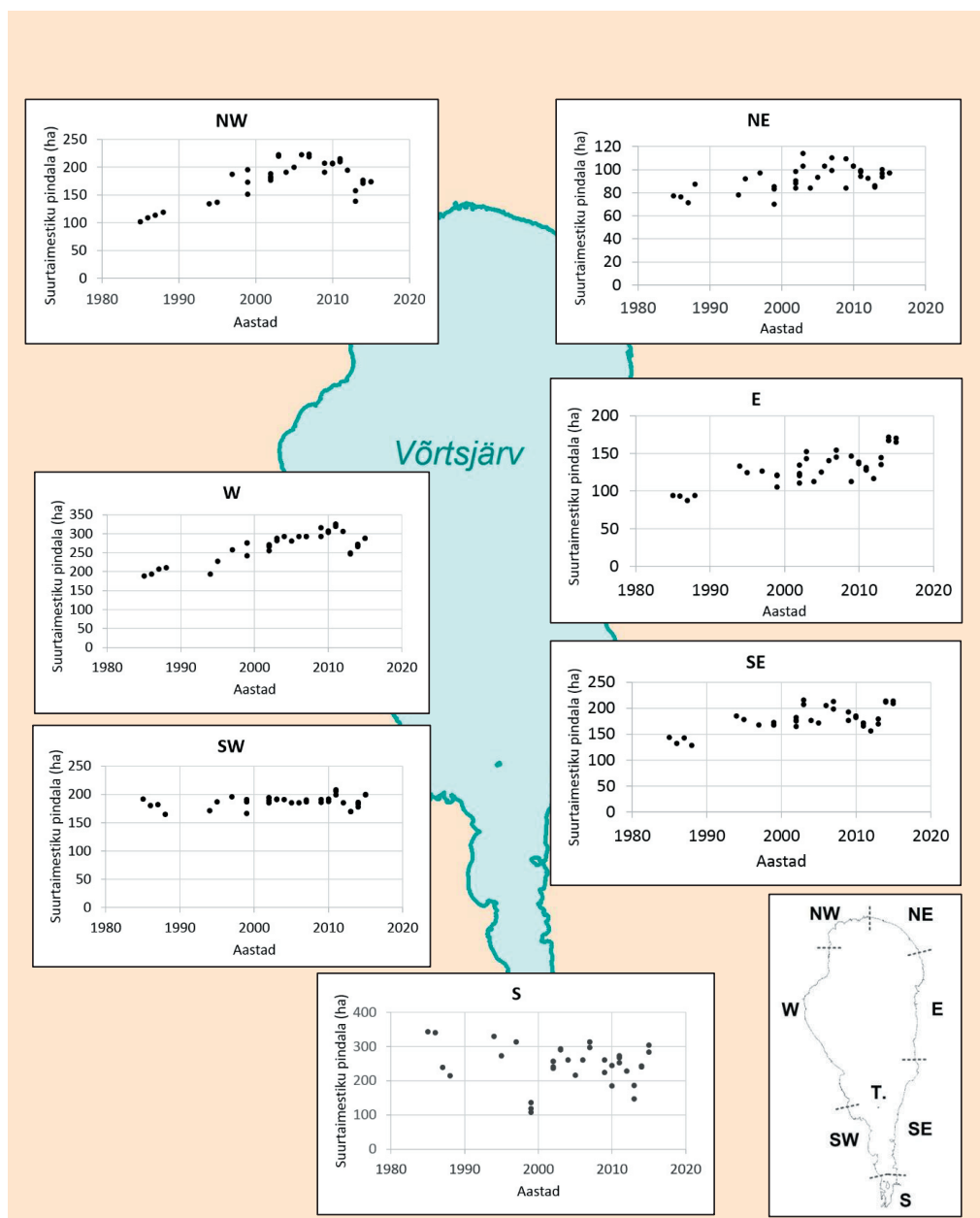
Joonis 10a. Kaldaveetaimestiku dünaamika Peipsi järve rannalõikudel. Rannalõikude asendit vt joonis 10b. Pihkva ja Lämmijärve nii Eesti- kui ka Venemaa-poolsetel rannikutel ning järve saartel on rannaroostike lappide pindala kõrgaeg olnud valdavalt eelmise aastakümne keskpaigas, aastatel 2005 kuni 2007. Sellele järgnevatel aastatel on kaldaveetaimestiku pindala enamikul rannalõikudel vähenenud. Kaldaveetaimestikuga lappide pindala vähenemine Pihkva järves tuleneb lappide pindala vähenemisest peamiselt järve Venemaa-poolsel rannikul. Suurjärve Eesti-poolsel rannikul on roostike pindala olnud suurim samas ajavahemikus, mis Pihkva järveski, aastatel 2005 kuni 2007. Suurjärve Venemaa-poolsel rannikul on täheldatav roostike pindala jätkuv laienemine. Suurjärve roostike pindala senini vältav laienemine (vt joonis 8) tuleb Suurjärve Venemaa ranniku roostike laienemise arvelt.

Sellele järgnevatel aastatel on kaldaveetaimestiku pindala enamikul rannalõikudel vähenenud. Kaldaveetaimestikuga lappide pindala vähenemine Pihkva järves tuleneb lappide pindala vähenemisest peamiselt järve Venemaa-poolsel rannikul. Suurjärve Eesti-poolsel rannikul on roostike pindala olnud suurim samas ajavahemikus, mis Pihkva järveski, aastatel 2005 kuni 2007. Suurjärve Venemaa-poolsel rannikul on täheldatav roostike pindala jätkuv laienemine, mis tuleb peamiselt Suurjärve Venemaa-ranniku roostike laienemise arvelt.



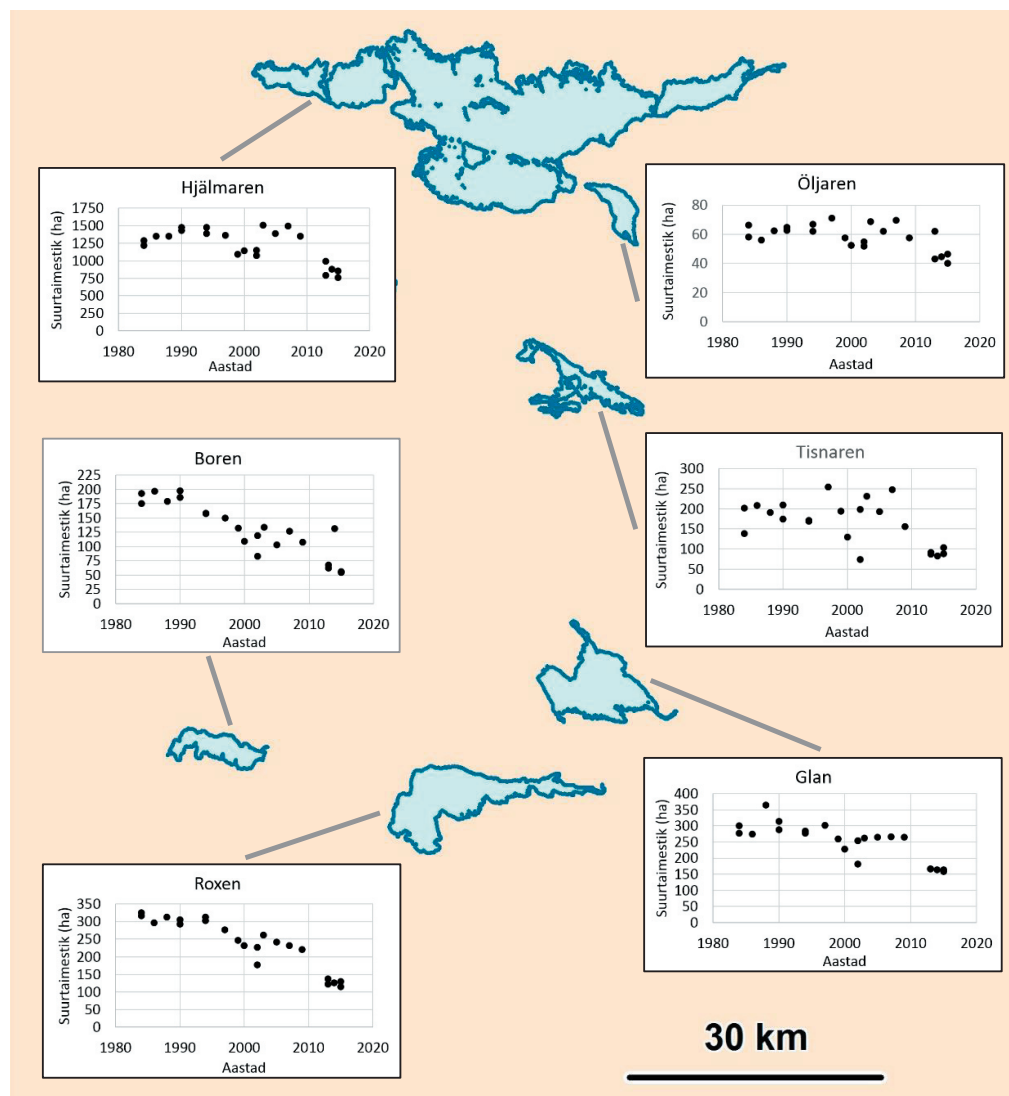
Joonis 10b. Peipsi järvel eristatud rannikulõikude asendiskeem. Valitud rannikulõikude roostike dünaamika on näidatud joonisel 10a.

Võrtsjärve põhjaosas on kaldaveetaimestiku lappide pindala olnud suurim möödunud kümnendil, seejärel on suurtaimestiku lappide pindala vähenenud (vt joonis 11). Tendents on ilmikas järve loodeosas Tānassilma jõe suudmelahe ümbruses. Järve loodeosas on ka suurimad roostikualad. Järve keskosa rannikutel, nii ida- kui ka läänerannikul, on täheldatav roostike pindala jätkuv kasv. Järve lõunaosas, Väikese Emajõe suudmeala ümbruses, valdavalt ujulehtedega taimestiku alal, on Landsati piltidega kaetud ajavahemikus täheldatav suurtaimestiku pindala vähenemistendents.

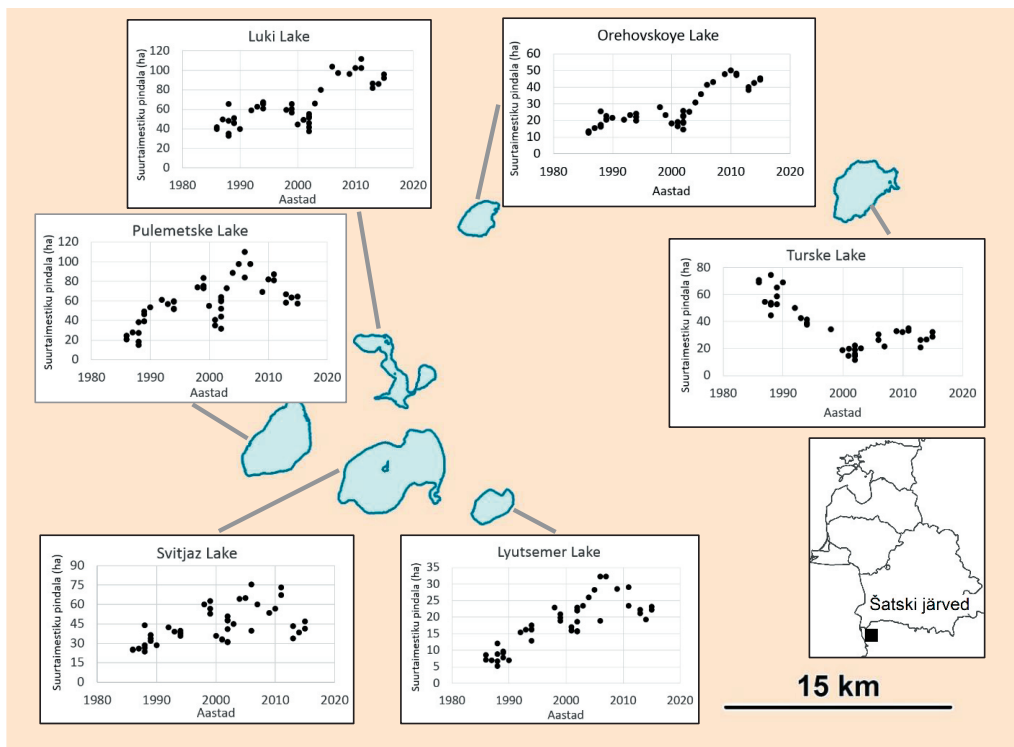


Joonis 11. Suurtaimestiku dünaamika Vortsjärvel eristatud rannalõikudel. Rannalõikude asendiskeemi vt joonise parempoolses allnurgas. Vortsjärve põhjaosas on kaldaveetaimestiku lappide pindala olnud suurim möödunud kümnendil, seejärel on suurtaimestiku lappide pindala vähenenud. Tendents on ilmekas järve loodeosas Tännassilma jõe suudmelahe ümbruses, seal on ka järve suurimad roostikualad. Järve keskosas, nii ida- kui ka lääne-rannikul, on täheldatav roostike pindala jätkuv kasv. Järve lõunaosas, Väikese Emajõe suudmeala ümbruses, valdavalt ujulehtedega taimestiku alal, on Landsati piltidega kaetud ajavahemikus täheldatav suurtaimestiku pindala vähenemistendents.

Euroopa järvede kaldaveetaimestiku dünaamikast on toodud kaks näidet: Rootsist Hjälmareni järve ja selle lähikonna järvedelt ning Ukrainast Šatski järvede alalt (vt joonis 12 ja 13). Mõlemad näited piltlikustavad Euroopa järvede viimase 30 aasta sagedasemaid tendentse. Eesti järvedega sarnaselt on eelmise aastakümne keskspaigas real järvedel alanud suurtaimestiku lappide pindala vähenemine. Osal Euroopa järvedest on suurtaimestiku lappide pindala vähenenud kogu Landsati piltidega kaetud ajavahemiku kestel, alates 1980. aastate keskspaigast.



Joonis 12. Suurtaimestiku lappide pindala dünaamika Hjälmareni järvel ning selle ümbruse järvedel Rootsis. Eesti järvedega sarnaselt on real järvedel eelmise aastakümne keskspaigas alanud suurtaimestiku lappide pindala vähenemine – Hjälmarén, Öljaren, Tisnaren. Real järvedel – Boren, Roxen ja Glan – on suurtaimestiku lappide pindala vähenenud kogu Landsati piltidega kaetud ajavahemiku kestel, alates 1980. aastate keskspaigast.



Joonis 13. Suurtaimestiku lappide pindala dünaamika Šatski järvedel Ukrainas. Suurtaimestiku lappide pindala kasv on Šatski järvedel väldanud möödunud kümnendi teise pooleni, seejärel on järgnenud suurtaimestiku lappide pindala vähenemine.

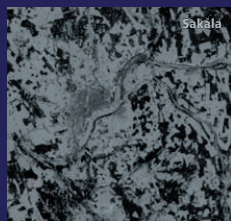
Viidatud kirjandus

- Liira, J., Feldmann, T., Mäemets, H., Peterson, U. (2010). Two decades of macrophyte expansion on the shores of a large shallow northern temperate lake - A retrospective series of satellite images, *Aquatic Botany* 93, 207–215.
- Liira, J., Peterson, U. (2011). Kahe seisundi mõõtmisel moodustunud bimodaalse ühisjaotuse klassifitseerimine. *Eesti Statistikaalsti teabevihik*, 21, 8–15 (<http://www.ms.ut.ee/ess/Failid/Teabevihud/ESSteabevihik21.pdf>)

Dynamics of emergent aquatic vegetation patches at Estonian and European lakes represented in a time series of Landsat satellite images

Summary

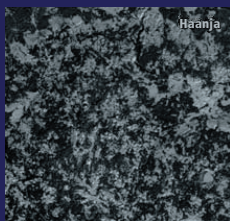
Emergent aquatic vegetation patches at shorelines of a set of large shallow lakes in Europe, extending from lakes in Finland in the North to Ukrainian lakes in the South were mapped with medium resolution Landsat Thematic Mapper, Thematic Mapper Plus and Operational land Imager images. Emergent aquatic vegetation patches are mostly composed of common reed (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.). The satellite images used span a time interval of 30 years from 1985 till 2016. Late summer images were used for emergent aquatic vegetation mapping for the vegetation maximum of reeds is in July or in August. Patches of reed were mapped extending towards the open water area from the shorelines. Shorelines as “mean-shorelines” of the lakes were derived from a stack of available spring-time Landsat images. An original non-parametric image interpretation methodology was applied on late summer images for emergent aquatic vegetation mapping. The results of the study reveal that following an increasing trend of macrophyte expansion at Lake Võrtsjärv and at Lake Peipsi that has lasted for more than twenty years the expansion has at least temporarily stopped. In case of Lake Peipsi this observation holds for the lake as a whole. Lake Pihkva, the southernmost part of the lake system shows a decrease in the macrophyte area. A slow macrophyte increase still prevails at the shores of Lake Peipsi *sensu stricto*. Similar pattern of emergent vegetation dynamics at coastlines at a number of European lakes is observable also in case of majority of European lakes studied. The pattern is described as an increase of patches till the mid-2000-s followed by a decrease in patch area.



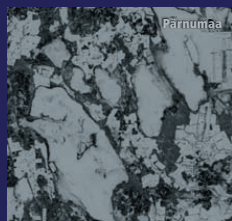
Sakala



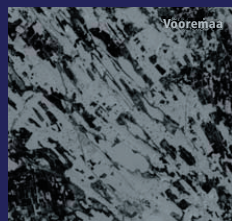
Alutaguse



Haanja



Pärnumaa

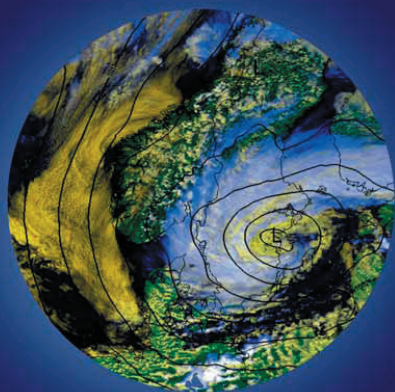


Võoremaa

KAUGSEIRE

EESTIS 2016

ARTIKLIKOGUMIK



TARTU OBSERVATOORIUM
eesti kosmosekeskus



Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

www.emu.ee



TARTU ÜLIKOOL



KESKKONNAAGENTUUR